

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ АЕРОНАВІГАЦІЇ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
КАФЕДРА АЕРОНАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри

д-р техн. наук, проф.

_____ В.Ю. Ларін

«__» _____ 2021 р.

ДИПЛОМНА РОБОТА

(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)

ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА

ЗА ОСВІТНЬО-ПРОФЕСІЙНОЮ ПРОГРАМОЮ

«СИСТЕМИ АЕРОНАВІГАЦІЙНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ»

**Тема: «Вплив інтервалу оновлення супутникових даних на точність
навігаційних визначень»**

Виконав: _____ **В.В. Жигула**

Керівник: к.т.н., доцент _____ **О.С. Погурельський**

Нормоконтролер _____ **Т.Ф.Шмельова**

Київ 2021

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аеронавігації, електроніки та телекомунікацій

Кафедра аеронавігаційних систем

Спеціальність 272 «Авіаційний транспорт»

ОПП «Системи аеронавігаційного обслуговування»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Ларін В.Ю.

_____ " _____ " _____ 2021р.

ЗАВДАННЯ

на виконання дипломної роботи

Жигули Вікторії Віталіївни

1. Тема дипломної роботи: «Вплив інтервалу оновлення супутникових даних на точність навігаційних визначень» затверджена наказом ректора від 22.10.2021 р. № 2239/ст.

2. Термін виконання роботи: з 25.10.2021 по 27.12.2021

3. Вихідні дані до проекту: апаратно–програмний комплекс для обробки сигналів глобальних систем супутникової навігації GPS, ГЛОНАСС, Galileo та BeiDou. Оброблена інформація використовується в середовищі Matlab для обрахунку і графічного представлення різних параметрів.

4. Зміст пояснювальної записки:

—

загальна

характеристика системи GNSS та супутникових систем GPS, ГЛОНАСС, Galileo та BeiDou;

- формуван
ня і запис даних для обробки;
- опис
програмних компонентів для оцінки точності навігаційних визначень;
- експериме
нтальна оцінка точності навігаційних визначень.

5. Перелік обов'язкового графічного (ілюстративного) матеріалу: дані пояснювальних матеріалів, рисунки результатів проведених досліджень, таблиці, додатки.

6. Календарний план–графік

№ пор.	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1.	Вибір напрямку дослідження.	01.09.21 р. – 25.10.21 р.	Виконав:
2.	Загальна характеристика системи GNSS та супутникових систем GPS, ГЛОНАСС, Galileo та BeiDou.	06.10.21 р. – 25.10.21 р.	Виконав:
3.	Формування даних для обробки.	22.10.21 р. – 24.10.21 р.	Виконав:
4.	Огляд навігаційних повідомлень супутників та поняття геометричного зниження точності.	24.10.21 р. – 10.11.21 р.	Виконав:
5.	Моделювання програмної частини в середовищі Matlab. Аналіз і обробка результатів.	10.11.21 р. – 23.11.21 р.	Виконав:
6.	Оформлення пояснювальної записки та інших документів	23.11.21 р. – 07.12.21 р.	Виконав:

7.	Підготовка документів та презентації	07.12.21 р. – 13.12.21 р.	Виконав:
----	--------------------------------------	------------------------------	----------

7. Дата видачі завдання: "25" жовтня 2021 р.

Керівник дипломного проекту _____ Погурельський Олексій Сергійович

Завдання прийняв до виконання _____ Жигула Вікторія Віталіївна

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи магістра «Вплив інтервалу оновлення супутникових даних на точність навігаційних визначень»: 105 с., 46 рис., 14 табл., 2 дод., 23 джерела.

Об'єкт дослідження – супутникові навігаційні системи.

Мета роботи – оцінити вплив інтервалу оновлення супутникових даних на точність навігаційних визначень .

Мета дослідження – проаналізувати отримані експериментальні дані точності навігаційних визначень та зробити висновки про те як впливає давність видачі супутникових даних.

В першому розділі дипломної роботи розглянуто існуючі системи супутникової навігації, описано функціональні сегменти, частотний спектр, зону покриття, супутникові угруповання та послуги, які надають супутникові навігаційні системи.

У другому розділі було розглянуто навігаційні повідомлення супутників, яких типів вони бувають та для яких цілей використовуються. Серед яких альманах - було розглянуто які формати альманаху існують та яку інформацію містять. Додатково було досліджено ефемериди, їхню ціль використання, режими, тощо.

Також було розглянуто геометричне зниження точності, що це за величина та які компоненти в собі складає.

У третьому розділі описано детальніше термін доступності, а також вимірювання доступності. У даному розділі було розглянуто також методи прогнозування доступності навігаційних супутників, що були використані у

дослідженні. Загалом було виконано дві програми PLANNING та GNSS Planning online.

Завдяки цим програмам ми отримали широкий перелік інформаційних даних, що ми можемо використати для прогнозування положення супутників.

У четвертому розділі було розглянуто програмне середовище Matlab для визначення положення супутників в певний період часу та на певній ділянці та геометричне погіршення точності. Результати було порівняно з онлайн сервісом, щоб отримати похибку вимірювання при альманахах різної дати виготовлення та виведений висновок.

СИСТЕМИ СУПУТНИКОВОЇ НАВІГАЦІЇ, ТОЧНІСТЬ, АЛЬМАНАХ,
ЕФЕМЕРИДИ, GPS

АРКУШ ЗАУВАЖЕНЬ

ЗМІСТ

ВСТУП	11
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ	12
РОЗДІЛ 1 СУПУТНИКОВІ СИСТЕМИ НАВІГАЦІЇ	14
1.1.Огляд на навігаційні супутникові системи	14
1.1.1 Вимоги до характеристик GNSS в авіації	17
1.2. GPS	20
1.3.ГЛОНАСС	25
1.3.1.Сигнали супутників ГЛОНАСС	26
1.4 GALILEO	27
1.5 BeiDou	29
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1	33
РОЗДІЛ 2 НАВІГАЦІЙНІ ПОВІДОМЛЕННЯ	36
2.1. Навігаційні повідомлення	36
2.2. Дані супутникового альманаху	36
2.2.1 Формат альманаху SEM	39
2.2.2 Формат альманаху YUMA	40
2.2.3 Генерація даних альманаху	42
2.2.4 Обчислення координат за даними альманаху	43
2.3. Дані ефемерид	45
2.3.1 Помилки передбачення ефемерид	51
2.4. Геометричне зниження точності	52
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2	51

РОЗДІЛ 3 МЕТОДИ ПРОГНОЗУВАННЯ ДОСТУПНОСТІ НАВІГАЦІЙНИХ СУПУТНИКІВ	56
3.1. Поняття доступність	56
3.2. Вимірювання доступності	56
3.2.1 Програма PLANNING	58
3.2.2 GNSS planning online	69
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3	71
РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА ВПЛИВУ ІНТЕРВАЛУ ОНОВЛЕННЯ СУПУТНИКОВИХ ДАНИХ НА ТОЧНІСТЬ НАВІГАЦІЙНИХ ВИЗНАЧЕНЬ	
4.1. Описання програмної частини	72
4.2. Дослідження впливу інтервалу часу	74
4.2.1. Експеримент	75
4.2.2. Відносне відхилення від дійсного значення	81
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4	82
ВИСНОВКИ ДО ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ	83
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	85
ДОДАТОК А	88
ДОДАТОК Б	100

ВСТУП

Актуальність дослідження.

За останнє десятиліття спостерігається стрімке зростання GNSS, термін, який уживається для позначення кількох діючих або запланованих супутникових навігаційних систем, таких як американська навігаційна система з часом і дальністю (NAVSTAR) GPS, російська глобальна навігаційна супутникова система (ГЛОНАСС). і майбутній європейський Galileo.

Нинішні темпи впровадження продуктів GNSS у різноманітні наукові, комерційні та повсякденні додатки лише прискорюються. Крім початкової мети позиціонування для військового використання, з часом розвивалися подальші види використання, такі як геодезія, дослідження часу, іоносфери і тропосфери.

Цей гострий і постійно зростаючий попит на методи, пов'язані з GNSS, у багатьох областях спонукав до багатьох досліджень. З часом з'явилося кілька різних методів обробки даних, і ці методи часто повинні відповідати жорстким і суперечливим вимогам щодо простору, швидкості обробки, енергоспоживання, надійності та ваги.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

- ACFT – Літальний апарат
- AFCS – Aircraft flight control system (Система керування польотом)
- BDS – BeiDou
- CNAV – Civil Aviation (Цивільна авіація)
- DOP – Dilution of precision (Погіршення точності)
- FDMA – Frequency Division Multiple Access (множинний доступ з поділом каналів за частотою)
- FTE – Flight Technical Error (Технічна помилка польоту)
- GCC – Galileo Control Center (Центр управління контролю)
- GDOP – Geometrical Dilution of precision (Геометричне погіршення точності)
- GEO □ Geostationary Earth Orbit (Геостационарна орбіта)
- GNSS – Global Navigation Satellite System (Глобальна навігаційна супутникова система)
- GPS □ Global Positioning System (Система глобального позиціонування)
- GSM – Global System for Mobile Communications (Глобальна система мобільного зв'язку)
- GSS – Galileo Sensory Stations (Сенсорні станції Галілео)
- IGSO □ Inclined Geosynchronous Orbit (Похила геосинхронна орбіта)
- IRNSS – Indian Regional Navigation Satellite System (Індійська регіональна супутникова система навігації)
- MEO □ Medium Earth Orbit (Середня навколосемна орбіта)

NSE – Navigation system error (Помилка систем навігації)

PBN – Performance-Based Navigation (Навігація, що базується на характеристиках)

PPP – Precise Point Positioning (Позиціонування високої точності)

RCC – Rescue and Coordination Center (Центр координації та порятунку)

QZSS – Quasi-Zenith Satellite System (Квазізенітна супутникова система)

SARPS – Standards and Recommended Practices (Рекомендовані стандарти та практики)

TSE – Total System Error (Повна системна помилка)

ГЛОНАСС – Глобальна навігаційна супутникова система

РОЗДІЛ 1

СУПУТНИКОВІ СИСТЕМИ НАВІГАЦІЇ

1.1 Огляд на навігаційні супутникові системи

Глобальна навігаційна супутникова система (GNSS) - це загальний термін, що описує будь-яке супутникове угруповання, яка надає послуги позиціонування, навігації та синхронізації (PNT) на глобальній чи регіональній основі.[\[1\]](#)

Хоча GPS є найбільш поширеною GNSS, інші країни використовують або розробляють свої власні системи для забезпечення додаткових, незалежних можливостей PNT. До таких систем належать ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou, IRNSS та QZSS.

Multi-GNSS – це система, здатна обчислювати положення, швидкість і час шляхом прийому супутникових сигналів, що транслюються з декількох навігаційних супутникових систем. Multi-GNSS дозволяє збільшити точність позиціонування, завадостійкість, здатність функціонування в сильно пересічній місцевості завдяки збільшенню кількості супутників порівняно з використанням однієї супутникової системи.[\[2\]](#)

Системи супутникової навігації стали невід'ємною частиною всіх застосувань, де мобільність відіграє важливу роль. Ці функції будуть в основі мобільного телефону мережі третього покоління (3G), такі як UMTS. У транспортних системах наявність 3-х ресиверів стане такою ж поширеною, як

ремені безпеки або подушки безпеки, і всі виробники автомобілів оснащують свої автомобілі початкового рівня цими пристроями.

Що стосується минулих розробок, GPS запустив різноманітні методики, продукти і, відповідно, додатки та послуги. Віхою супутникової навігації є позиціонування в реальному часі та синхронізація часу. З цієї причини слід виділити реалізацію систем збільшення площі, оскільки вони дозволяють значно підвищити точність і продуктивність цілісності. WAAS, EGNOS і MSAS забезпечують над США, Європою, Японією корисну інформацію розширення до послуг GPS, ГЛОНАСС та Galileo.

Розвиток GNSS має цікавий аспект через його чутливу природу. Значні події або розробки завжди підпадають під кілька відмінностей: технологічні розробки та політичні рішення.

GPS і ГЛОНАСС на всіх етапах удосконалення тісно пов'язані з цими відмінностями. Схвалення та запуск європейської програми Galileo вважається найбільш реальним нововведенням. Технологічні та політичні рішення в Galileo підтверджують, що сумісність і несумісність повинні бути досягнуті в найближчі роки. Такі питання є справжнім удосконаленням GNSS на користь установ та організацій.

Застосування GNSS у всіх сферах відіграватимуть ключову роль, переміщуючи його використання від транспортної сфери до мультимодального використання на відкритому повітрі та всередині приміщень. Очікується, що GNSS значно підвищить точність в області розташування.

Концепція системи відліку для навігації є важливою, оскільки всі застосування GNSS пов'язані з використовуваною системою координат. Основне застосування GNSS зосереджено на можливості визначення позиції в Глобальній системі відліку в будь-який час у будь-який час на земній кулі простим, швидким і економічно ефективним способом.

Інтеграція між GNSS та іншими суміжними технологіями, такими як телекомунікації (GSM, GPRS, UMTS), географічні інформаційні системи (GIS)

та інерціальна навігаційна система (INS), створила численні програми, які потребують більше часу для детального обговорення.[3]

Багато дослідницьких зусиль було докладено, щоб знайти кожне нове застосування для підвищення якості нашого життя, використовуючи переваги GNSS.

GNSS включає в себе групу супутників, що обертаються навколо Землі, безперервно передають сигнали, які дозволяють користувачам визначати своє тривимірне (3D) положення з глобальним покриттям.

Протягом багатьох років єдиною повністю діючою системою GNSS були США Глобальна система позиціонування (GPS). Російська глобальна навігаційна супутникова система (ГЛОНАСС) була відновлена до повної роботи в грудні 2011 року. Китайські системи BeiDou та європейські Galileo зараз знаходяться в стадії розробки, хоча BeiDou запустила початкову експлуатаційну службу (Фаза II) наприкінці грудня 2011 року.

Принцип позиціонування заснований на розв'язанні елементарної геометричної проблеми, що включає відстані (діапазони) користувача до набору принаймні чотири супутники GNSS з відомими координатами. Ці діапазони та координати супутника визначаються приймачем користувача за допомогою сигналів і навігаційних даних, що передаються супутниками; отримані координати користувача можна обчислити з точністю до кількох метрів. Однак позиціонування на сантиметровому рівні можна досягти за допомогою більш досконалих методів. На рисунку 1.1 зображено структуру GNSS.

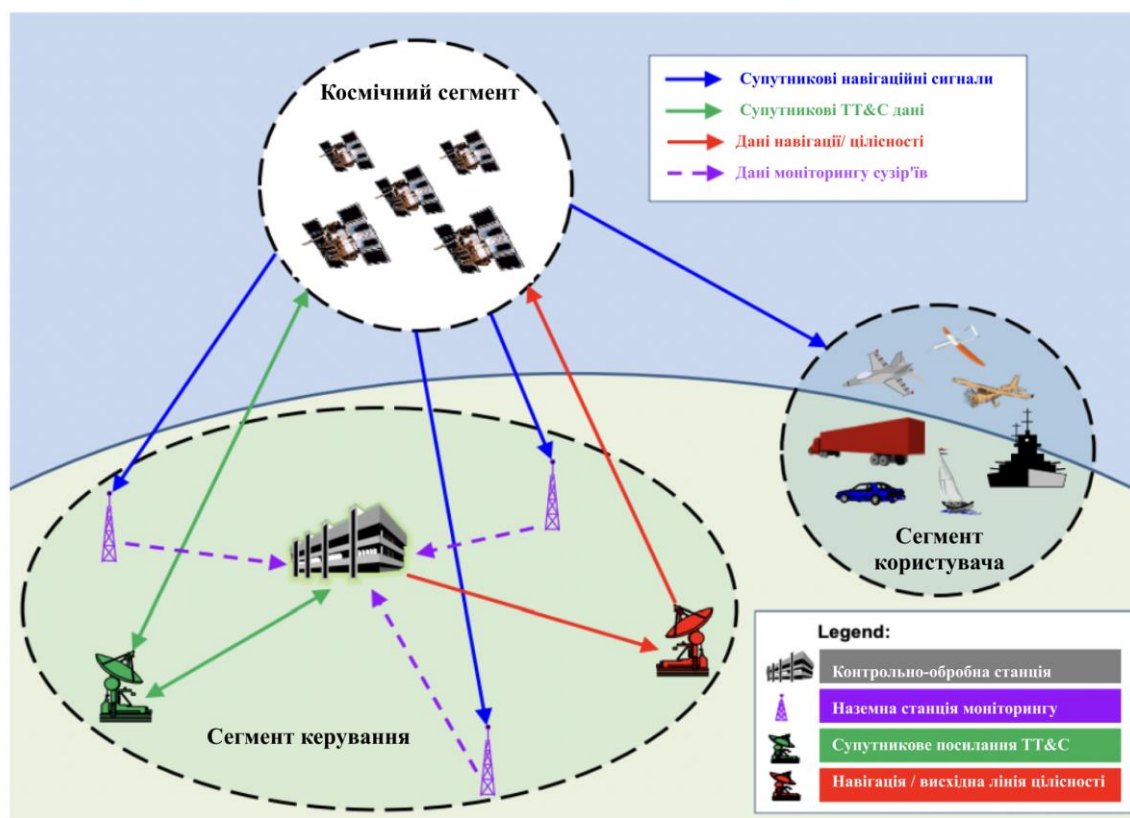


Рис.1.1. GNSS структура

1.1.1 Вимоги до характеристик GNSS в авіації

Авіаційна спільнота приклала чимало зусиль - раціоналізація та стандартизація навігаційних характеристик параметрів і вимог.

Необхідні навігаційні характеристики (RNP), що навігаційна система повинна досягти. Точність, цілісність, доступність і безперервність використовуються для опису RNP для операції на різних етапах польоту та в межах визначених класів повітряного простору. Чотири параметри, які використовуються для характеристики навігації продуктивність системи:

- Точність: точність оцінки або вимірювання положення ПК (транспортного засобу, літака чи судна) у заданому місці час – це ступінь відповідності цієї позиції з справжнє положення, швидкість та/або час ПК. Оскільки точність — статистичний показник ефективності, твердження

точності навігаційної системи безглуздо, якщо тільки вона включає твердження про невизначеність (наприклад, впевненість рівень) у відповідній позиції;

Точність забезпечення радіонавігації виражається статистичним ступенем похибки системи і визначається такими показниками: прогнозованою точністю місцеположення відносно земних географічних чи геодезичних координат; повторюваною точністю, коли користувач може повернутися в місцеположення, координати якого були обчислені в попередній момент часу тією самою навігаційною системою; відносною точністю, з якою користувач може встановити одне місцеположення відносно іншого незалежно від будь-якої похибки визначення відповідного дійсного місцеположення.

Точність використання системи - сукупність похибок навігаційного датчика, бортового приймача, відображення і пілотування;[\[4\]](#)

- Цілісність: Цілісність - це міра довіри, яка може бути розміщено в правильності інформації, наданої а навігаційна система. Цілісність включає в себе здатність системи для своєчасного попередження користувачів, коли систему не слід використовувати для навігації;
- Безперервність: безперервність системи – це здатність загальної системи (містить усі елементи, необхідні для підтримки положення судна в межах визначеного району) виконувати його функціонувати без перерви під час передбачуваної операції. Точніше, безперервність - це ймовірність того, що зазначена продуктивність системи буде збережена для тривалість фази роботи, припускаючи, що система була доступна на початку цього етапу експлуатації;
- Доступність: Доступність навігаційної системи є відсоток часу, протягом якого можна використовувати послуги системи за допомогою навігатора. Доступність є показником здібностей системи для надання корисної послуги в межах зазначеного зона покриття. Доступність сигналу – це відсоток часу що навігаційні сигнали, що передаються із зовнішніх

джерел, є доступні для використання. Це функція як фізичної характеристики навколишнього середовища та тех можливості засобів передавача;

У авіаційному застосуванні точність є мірою різниці між розрахунковим і справжнім або бажаним положенням літака в номінальних безвідмовних умовах. Зазвичай це виражається як 95% межі похибок горизонтального та вертикального положення. У контексті авіоніки розрізняють два типи точності що необхідно враховувати: точність щодо навігації самою системою та точністю, що досягається комбінацією систем навігації та керування польотом.

Цей другий тип точності називається Total System Error (TSE) і вимірюється як відхилення від необхідної траєкторії польоту. У великих комерційних літаках і кількох військових літаках необхідна траєкторія польоту та пов'язана з нею інструкція розраховується системою керування польотами (FMS) і постійно оновлюється на основі інформації про погоду. Навігаційна система оцінює вектор стану ПК (тобто положення, швидкість, положення та пов'язані з ним швидкості), визначає відхилення від необхідної траєкторії польоту та надсилає цю інформацію або на дисплеї кабіни, або на автоматичну систему керування польотом (AFCS).

Похибка в оцінці позиції літака називається помилкою системи навігації (NSE), яка є різницею між справжнім положенням літака та його відображеним положенням. Різниця між бажаною траєкторією польоту та відображеним положенням літака називається Flight Technical Error (FTE) і враховує динаміку літака, ефекти турбулентності, інтерфейс людини-машини тощо. Як показано на рис.1.2, TSE отримують як вектор сума NSE та FTE.

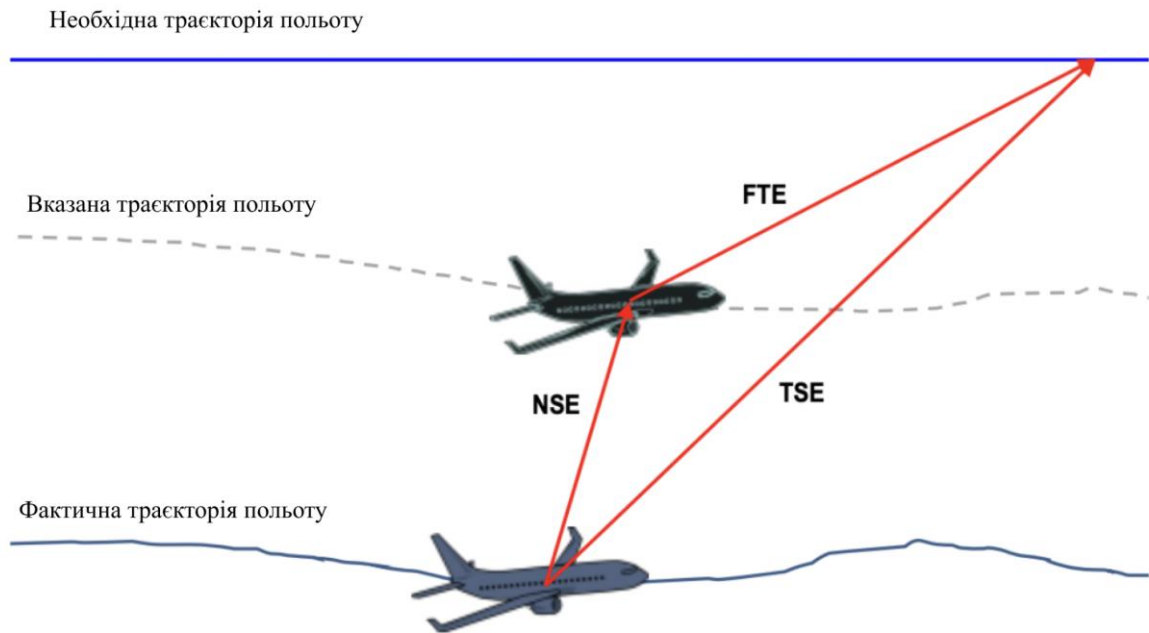


Рис.1.2. Точність навігації в авіаційному застосуванні

1.2 GPS

Міністерство оборони США розробило Navstar GPS, яка є всепогодною космічною навігаційною системою для задоволення потреб збройних сил США та точного визначення їх положення, швидкості та часу в загальній системі відліку, де завжди на Землі або поблизу неї на безперервній основі.

GPS була першою системою GNSS. Супутники GPS вперше були запуснені в кінці 1970-х - початку 1980-х років для Міністерства оборони США. З того часу було запуснено кілька поколінь супутників GPS. Спочатку GPS був доступний тільки для використання у військових цілях, але в 1983 році було прийнято рішення поширити GPS на цивільне використання. [5]

GPS складається з трьох основних компонентів:

1. Космічний сегмент (супутник): Космічний сегмент системи складається з супутників GPS на орбіті; початковий космічний сегмент був розроблений з чотирма супутниками в кожній із шести орбітальних площин, нахилених під

кутом 55 градусів до екватора. Ці космічні апарати (КА) посилають радіосигнали з космосу, як показано на рисунку 1.2. Також космічний сегмент представлений у таблиці 1.1.

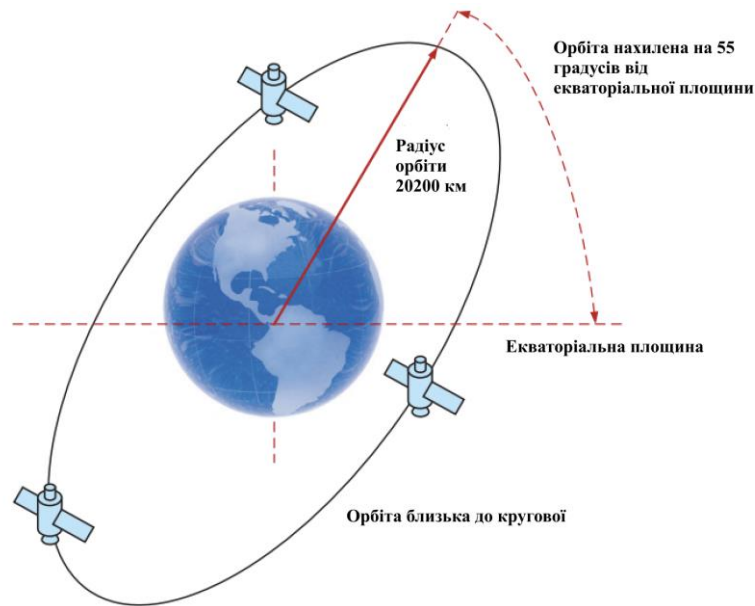


Рис.1.3. Орбіта супутника GPS [6]

Таблиця 1.1

Сузір'я супутників GPS [7]

Супутники	31
Орбітальні площини	6
Нахил орбіти	55 градусів
Радіус орбіти	20 200 км

2. Сегмент керування (станції наземного стеження та моніторингу):

Сегмент керування складається з головних контрольних станцій та шести станцій моніторингу по всьому світу. Головний контрольний об'єкт розташований на базі ВПС Шрівер у штаті Колорадо, у Сполучених Штатах Америки з резервними станціями в Гейтерсбургу, штат Меріленд.

3. Сегмент користувача (приймачі повітряного, наземного та морського базування): Сегмент користувача GPS представляє наземні приймачі GPS, які обробляють сигнали супутника Navstar та обчислюють позиції та/або оцінки швидкості та часу користувача.

Супутники розсіяні в шести орбітальних площинах на майже кругових орбітах на висоті близько 20 200 км над поверхнею Землі, нахилених на 55 градусів по відношенню до екватора і з орбітальним періодом приблизно 11 годин 58 хвилин (половина зоряної доби). Категорії: Блок I, Блок II, Блок IIR (R для поповнення) і Блок IIA (A для розширеного), а також запланована додаткова категорія Блок IIF (ICD-GPS, 2003). На рисунку 1.2 показані основні сегменти GPS.

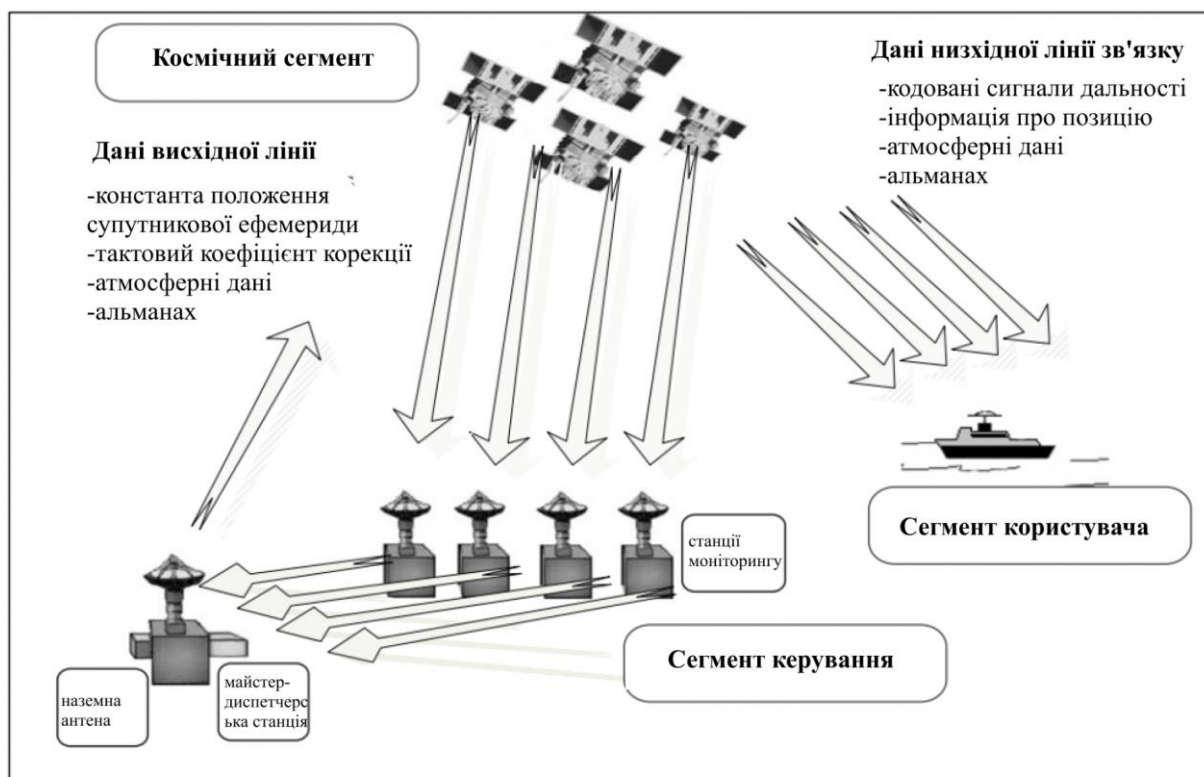


Рис.1.4. GPS сегменти

Сигнали GPS Кожен супутник GPS має атомний годинник цезію та/або рубідію для надання інформації про час для сигналів, що передаються супутниками.

Для кожного супутникового годинника передбачена внутрішня корекція годинника. Кожен супутник GPS передає два несучих сигналу L-діапазону з розширеним спектром — сигнал L1 з несучою частотою $f_1 = 1575,42$ МГц і сигнал L2 з несучою частотою $f_2 = 1227,6$ МГц. Ці дві частоти є інтегральними кратними $f_2 = 1540f_0$ і $f_2 = 1200f_0$ базової частоти $f_0 = 1,023$ МГц. Сигнал L₁ від кожного супутника використовує двійкову фазову маніпуляцію (BPSK), модульований двома кодами псевдовипадкового шуму (PRN).

Компенсація затримок поширення це одна з мотивів використання двох різних несучих сигналів, L1 і L2. Оскільки затримка змінюється приблизно як обернений квадрат частоти сигналу f (затримка $\propto f^{-2}$), вимірну диференціальну затримку між двома несучими частотами можна використовувати для компенсації затримки на кожній несучій. Мультиплексування з кодовим розділенням Знання кодів PRN дає користувачам незалежний доступ до кількох супутникових сигналів GPS на одній частоті несучої. Детальні характеристики сигналу GPS подані в таблиці 1.2

Сигнал, що передається конкретним сигналом GPS, можна вибрати шляхом генерування та узгодження або кореляції коду PRN для цього конкретного супутника. Всі коди PRN відомі і генеруються або зберігаються в приймачах супутникового сигналу GPS, що передаються наземними спостерігачами. Перший код PRN для кожного супутника GPS, який іноді називають точним кодом або P-кодом, є відносно довгим, дрібнозернистим кодом мають відповідну тактову частоту і частоту мікросхеми $10f_0 = 10,23$ МГц. Другий код PRN для кожного супутника GPS, який іноді називають чистим або грубим кодом отримання або C/A-кодом, призначений для полегшення швидкого отримання супутникового сигналу та передачі на P-код. Це відносно

короткий, більш грубозернистий код, який має відповідну тактову частоту або частоту мікросхем $f_0 = 1,023$ МГц. С/А-код для будь-якого GPS

супутник має довжину 1023 мікросхеми або кроки часу перед його повторенням. Повний Р-код має тривалість 259 днів, протягом яких кожен супутник передає унікальну частину повного Р-коду. Частина Р-коду, що використовується для даного супутника GPS, має тривалість точно одного тижня (7000 днів), перш ніж ця частина коду повторюється.

Прийняті методи генерації С/А-коду та Р-коду були встановлені розробником супутника 1 у 1991 році.[8]

Навігаційний сигнал потік супутників GPS включає навігаційну інформацію про ефемериди супутника GPS, що передає, і альманах для всіх супутників GPS, з параметрами, що забезпечують приблизні поправки для затримок поширення іоносферного сигналу, що підходять для одностотних приймачів, і для часу зміщення між супутниковими годинниками. час і справжній час GPS. Навігаційна інформація передається зі швидкістю 50 бод.

Таблиця 1.2

Характеристики сигналу GPS

Позначення	Частота	Опис
L1	1575,42 МГц	L1 модулюється кодом С/А (Coarse/Acquisition) та кодом Р (Precision), який зашифровано для військових та інших авторизованих користувачів.
L2	1227,60 МГц	L2 модулюється Р-кодом і, починаючи з супутників Block IIR-M, кодом L2C (цивільний). L2C розпочав трансляцію повідомлень цивільної навігації (CNAV)
L5	1176,45 МГц	L5, доступний з супутників Block IIF, розпочав трансляцію повідомлень CNAV.

1.3 ГЛОНАСС

ГЛОНАСС (Глобальна навігаційна супутникова система або «Глобальна навігаційна «Супутникова система») майже ідентичний GPS. Супутникова радіонавігаційна система Глонасс надає користувачам інформацію про позиціонування та час. Ним керує Міністерство оборони Російської Федерації (ГЛОНАСС-ICD, 2002).

Космічний сегмент ГЛОНАСС складається з 24 супутників у трьох орбітальних площинах, по вісім супутників на площину. Геометрія сузір'я ГЛОНАСС повторюється приблизно раз на вісім днів. Період обертання кожного супутника становить приблизно $8/17$ сидеричного (Сидеричний день – це час, необхідний для одного повного оберту Землі відносно певної зірки. Сидеричний день становить близько чотирьох хвилин коротше середнього сонячного дня), так що після восьми зоряних днів супутники ГЛОНАСС пройшли рівно 17 орбітальні оберти. Кожна орбітальна площина містить вісім однаково рознесені супутники. Один із супутників буде те саме місце на небі в той самий зоряний час щодня. Супутники розміщені на номінально кругових орбітах з нахилом цілі 64,8 градусів і радіусом орбіти 19 140 км, що приблизно на 1060 км нижче, ніж супутники GPS.[9]

Супутниковий сигнал ГЛОНАСС ідентифікує супутник і включає:

- Позиціонування, швидкість та прискорення інформація для обчислення місцезнаходження супутника.
- Супутникова інформація про стан здоров'я.
- Зміщення часу ГЛОНАСС від UTC
- Альманах усіх інших супутників ГЛОНАСС.

Сузір'я ГЛОНАСС забезпечує видимість різної кількості супутників залежно від вашого місцезнаходження. Щонайменше чотири супутники

дозволяє приймачу ГЛОНАСС розрахувати своє положення в трьох вимірах і синхронізувати з системним часом. Детальні дані про супутники представлені у таблиці 1.3.

Таблиця 1.3

Сузір'я супутників ГЛОНАСС

Супутники	24 + 3 резервні
Орбітальні площини	3
Нахил орбіти	64,8 градусів
Радіус орбіти	19 140 км

1.3.1 Сигнали супутників ГЛОНАСС

Глонасс передає C/A-код на L₁, P-код на L1 і L2. Спостережувані Глонасс (код і фаза) подібні до GPS. Основна відмінність між GPS і ГЛОНАСС полягає в тому, що ГЛОНАСС використовує технологію множинного доступу з частотним розділенням (FDMA) для розрізнення сигналів різних супутників, але GPS і Galileo використовують (Code Division Multiple Access, CDMA) для розрізнення супутників. Усі супутники Глонасс передають однакові C/A- та P-коди, але кожен супутник має дещо різні несучі частоти. У таблиці 1.4 наявні характеристики сигналів ГЛОНАСС.

Таблиця 1.4

Характеристики сигналу ГЛОНАСС

Позначення	Частота	Опис
L1	1598.0625 - 1609.3125 МГц	L1 модулюється сигналами HP (висока точність) та SP (стандартна точність).
L2	1242.9375 - 1251.6875 МГц	L2 модулюється сигналами HP і SP. Код SP ідентичний коду, що передається на L1.

На відміну від GPS, де ефемереди мовлення визначаються модифікованими кеплерівськими елементами, ефемереди мовлення супутників ГЛОНАСС визначаються положеннями та швидкостями, віднесеними до систем, орієнтованих на Землю та Землю (PZ-90). Трансляція ефемереди супутників Глонасс оновлюються кожні 30 хвилин.

1.4 GALILEO

GALILEO – це європейська ініціатива щодо найсучаснішої глобальної навігаційної супутникової системи, яка забезпечує високоточні та гарантовані послуги глобального позиціонування під цивільним контролем. Galileo не буде надто відрізнятися від інших версій GNSS (модернізовані GPS і Glonass (Salgado et al., 2001)).[\[10\]](#)

- Сегменти GALILEO

Сегменти Galileo майже схожі на GPS, але з деякими модифікаціями. Основним розширенням Galileo в порівнянні з GPS є впровадження глобального/регіонального сегмента для моніторингу цілісності. Мета полягає в тому, щоб допомогти критично важливим для безпеки навігації повітряних

суден, а також визначити місце розташування та направляти залізничні поїзди (GALILEO, 2003).

- Космічний сегмент

Космічний сегмент або особливості сузір'я складається з 30 супутників середньої орбіти Землі (МЕО) (27 і 3 активних запасних супутника), розподілених рівномірно й регулярно на трьох орбітальних площинах.

Прогнозована висота дещо більша, ніж для GPS 23 616 км, а нахил становить 56° (Benedicto and Ludwig, 2002).

Космічний сегмент Galileo узагальнено в таблиці 1.5. Після того, як сузір'я запрацює, навігаційні сигнали Galileo забезпечуватимуть покриття на всіх широтах. Велика кількість супутників разом з оптимізацією сузір'я та наявністю трьох активних резервних супутників гарантує, що втрата одного супутника не матиме помітного впливу на сегмент користувачів. Два центри управління Galileo (GCC), розташовані в Європі, контролюють супутники Galileo. Дані, відновлені глобальною мережею з тридцяти сенсорних станцій Galileo (GSS), будуть надіслані до GCC через резервну мережу зв'язку.

GCC використовуватимуть дані від сенсорних станцій для обчислення інформації про цілісність і для синхронізації супутникового часу з годинниками наземної станції. Центри управління будуть зв'язуватися з супутниками через станції висхідного зв'язку, які будуть встановлені по всьому світу.

Galileo забезпечить глобальну пошуково-рятувальну функцію (SAR) на основі оперативного пошуково-рятувального супутникового Cospas-Sarsat 2 системи. Для цього кожен супутник Galileo буде оснащений транспондером, який передаватиме сигнали лиха до Центру координації порятунку (RCC), який потім ініціює рятувальну операцію. При цьому система подаватиме сигнал користувачеві, інформуючи про те, що його ситуація виявлена і щодопомога триває. Ця остання функція є новою і вважається серйозним оновленням у порівнянні з існуючими системами, які не забезпечують зворотний зв'язок користувач.

Таблиця 1.5

Сузір'я супутників Galileo

Супутники	24 + 6 резервних
Орбітальні площини	3
Нахил орбіти	56 градусів
Радіус орбіти	23 222 км

- Наземний сегмент

Наземний сегмент Galileo відповідає за управління групою навігаційних супутників, контроль основних функцій навігаційної місії, таких як визначення орбіти супутників і синхронізація годинника, а також визначення та розповсюдження (через супутники МЕО) інформації про цілісність, наприклад попередження. сповіщення в межах вимог часу до тривоги на глобальному рівні. Глобальний наземний сегмент також забезпечить інтерфейси з сервісними центрами Землі.

Сегмент управління складатиметься з приблизно 12-15 опорних станцій, 5 станцій висхідної лінії зв'язку та двох центрів управління. Наземний сегмент також включатиме 16-20 станцій моніторингу, три станції висхідної лінії зв'язку для даних цілісності та дві центральні станції для обчислень цілісності.

- Сегмент користувача:

Сегмент користувачів складається з різних типів користувальницьких приймачів з різними можливостями, пов'язаними з різними сигналами GALILEO, щоб надавати різноманітні послуги GALILEO.

Таблиця 1.6

Характеристики сигналу Galileo

Позначення	Частота	Опис
E1 A	1575.42 MHz	Державний регульований службовий сигнал
E1 B		Безпека життєдіяльності та відкритий службовий сигнал (дані)
E1 C		Безпека життя та відкритий службовий сигнал (без даних).
E5a I	1176.45 MHz	Відкритий службовий сигнал (дані).
E5a Q		Відкритий службовий сигнал (без даних).
E5b I	1207.14 MHz	Безпека життєдіяльності та відкритий службовий сигнал (дані).
E5b I		Безпека життєдіяльності та відкритий службовий сигнал (без даних).
AltBOC	1191.795 MHz	Комбінований сигнал E5a/E5b.
E6 A	1278.75 MHz	Державний регульований службовий сигнал.
E6 B		Комерційний службовий сигнал (дані).
E6 C		Комерційний службовий сигнал (без даних).

1.5 BeiDou

BDS (BeiDou) — це глобальна навігаційна система, розроблена та керована Китаєм незалежно. Як значна космічна інфраструктура, BDS надає послуги постійного, всепогодного та високоточного позиціонування, навігації та хронометражу користувачам по всьому світу.

Наприкінці 20-го століття Китай почав досліджувати шлях розвитку супутникової навігаційної системи, відповідний національним умовам, і поступово сформулював триетапний план розвитку. Першим кроком є завершення будівництва навігаційної демонстраційної системи BeiDou (BDS-1) та надання послуг усій країні. Другим кроком є завершення будівництва навігаційної супутникової (регіональної) системи BeiDou (BDS-2) та надання послуг в Азіатсько-Тихоокеанському регіоні до кінця 2012 року (Yang et al. 2014). Третій крок - це завершити BDS та надавати послуги приблизно до 2020 року (China Satellite Navigation Office 2016; Yang et al. 2018, 2019, 2020). Після успішного запуску останнього супутника на геостаціонарній орбіті Землі (GEO) 23 червня 2020 року BDS завершила створення сузір'я. Наразі на орбіту виведено 55 супутників BDS, які надають глобальним користувачам більш безперервні, стабільні, надійні служби позиціонування, навігації та визначення часу.[11](#)

Таблиця 1.7

Основні показники роботи RNSS Beidou

Експлуатаційні характеристики		Показники ефективності
Точність обслуговування (95%)	точність позиціонування	Горизонтальна ≤ 10 m вертикальна ≤ 10 m
	точність хронометражу точність вимірювання швидкості	≤ 20 ns ≤ 0.2 m/s
доступність послуги		$\geq 99\%$

Другий етап системи BeiDou було завершено в червні 2020 року і забезпечує глобальне покриття з посиленням регіональним покриттям. Космічний сегмент складається з сузір'я в 8 супутників GEO, 10 IGSO та 27 MEO, як показано в таблиці 2.8. [12]

Таблиця 1.8

Сузір'я супутників BeiDou

Супутники	8 GEO	10 IGSO	27 MEO
Орбітальні площини	□	□	3
Нахил орбіти	□	55°	55°
Радіус орбіти	35 787 км	35 787 км	21 525 км

У таблиці 2.9 представлені характеристики сигналів системи BeiDou, що засновані на технології CDMA. [13]

Таблиця 1.9

Характеристики сигналів системи BeiDou

Позначення	Частота	Опис
B1	1561.098 МГц	B1 та B2 забезпечують як сигнали державної служби, так і обмежені службові сигнали.
B2	1207.140 МГц	
B3	1268,520 МГц	B3 забезпечує лише обмежені службові сигнали.

Системою BeiDou надаються три рівня обслуговування:

- Державна служба для цивільного використання і безкоштовна для користувачів. Державна служба забезпечує точність визначення місця розташування до 10 метрів, точність швидкості в межах 0,2 метра в секунду і точність синхронізації до 10 наносекунд.
- Ліцензійний сервіс доступний тільки користувачам, які оформили підписку. Ліцензований сервіс підвищує точність позиціонування до 2 метрів. Ця служба також забезпечує двонаправлений обмін короткими повідомленнями (120 китайських символів) і надає інформацію про стан системи.
- Обмежена військова служба, точніша, ніж державна служба, також надає інформацію про стан системи і можливості військового зв'язку.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

На основі проведеного нами огляду наукових джерел у першому розділі я уточнила зміст понять «системи супутникової навігації», вимоги характеристик GNSS в авіації та розвиток.

Також були розглянуті існуючі системи супутникової навігації, такі як GPS, ГЛОНАСС, Galileo та BeiDou. Описані функціональні сегменти, частотний спектр, зона покриття та групи супутників вищевказаних систем. Також були розглянуті послуги, які надаються цими системами.

Як висновок створена порівняльна таблиця GPS, ГЛОНАСС, GALILEO і BeiDou.

Табл.1.10

Порівняння GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou

Характеристики	GPS	ГЛОНАСС	GALILEO	BEIDOU
Перший запуск	Лютий 1978	Жовтень 1982	Грудень 2005	Квітень 2007
ФОС	Лютий 1995	Січень 1996- грудень 2011	-	до 2020
Фінансування	громадський	громадський	громадський та приватний	громадський
Номинальний номер SV	24	24	27	27
Орбітальні площини	6	3	3	3

Продовження таблиці 1.10 Порівняння GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou

Нахил орбіти	55°	64.8°	56°	55°
Піввісь	25,560 км	25,508 км	29,601 км	21,500 км
Поділ орбітальної площини	60°	120°	120°	-
Період обертв	11год57.96хв	11год15.73хв	14год 4.75хв	12 год 35 хв
Геодезична довідка	WGS-84	PZ-90	GTRF	CGS2000
Система часу	GPS time, UTC (USNO)	ГЛОНАСС time, UTC	Galileo system time	BeiDou System time
Поділ сигналу	CDMA	FDMA	CDMA	CDMA
Кількість частот	1-L1,L2,L3	one per two antipodal SV	3(4)-E1,E6,E5(E5a, E5b)	3-B1,B2,B3
Частота (MHz)	L1: 1,575.420	G1:1,602.000	E1: 1,575.420	B1: 1,575.420
	L2: 1,227.600	G2:1,246.000	E6: 1,276.750	B2: 1,191.795
	L3: 1,176.450	G3:1,204.704	E5: 1,191.795	B3: 1,268.520
Кількість кодів діапазону	11	6	10	-

РОЗДІЛ 2

НАВІГАЦІЙНІ ПОВІДОМЛЕННЯ

2.1 Навігаційні повідомлення

Навігаційне повідомлення містить всю необхідну інформацію, що дозволяє користувачам виконувати службу позиціонування. Сюди входять параметри ефемерид, необхідні для обчислення координат супутника з достатньою точністю, параметри часу та поправки годинника, необхідні для обчислення зміщення супутникового годинника та перетворення часу, параметри сервісу з інформацією про стан супутника, модель параметрів іоносфери, необхідна для одночастотних приймачів та альманахи, що дозволяють обчислювати положення «всіх супутників у сузір'ї» зі зниженою точністю (1–2 км похибки 1σ), яка потрібна для отримання сигналу приймача. Параметри ефемерид та годинника зазвичай оновлюються кожні дві години, при цьому альманах оновлюється щонайменше кожні шість днів

Супутники транслюють два типи даних: альманахи і ефемериди.

2.2 Дані супутникового альманаху

Кожен супутник передає орбітальні дані, які називаються альманах, який дозволяє користувачеві обчислити приблизне місцезнаходження кожного супутника в сузір'ї GPS в будь-який момент часу. Дані альманаху недостатньо точні для визначення позиції, але їх можна зберігати в приймачі, де вони залишаються дійсними протягом багатьох місяців. Вони використовуються в основному для визначення того, які супутники є видимими в певному місці, щоб приймач міг шукати ці супутники при першому ввімкненні. Вони також можуть бути використані для визначення приблизного очікуваного доплерівського зсуву сигналу, щоб допомогти у швидкому отриманні супутникових сигналів.[14]

Альманах — це набір відомостей про поточний стан навігаційної системи в цілому, включаючи загублені ефемериди, які застосовуються для пошуку видимих супутників і вибору оптимального сузір'я, що містять відомості. Альманах містить параметри орбіт всіх супутників. Кожен супутник передає альманах для всіх супутників. Дані альманаха не відрізняються великою точністю та дійсні декілька місяців.

Щоб отримати весь альманах з одного супутника, потрібно 12,5 хвилин. У разі можливості регулярно здійснювати оновлення, супутникові дані оновлюються кожні 24 годин загалом із завантаженими даними до 60 днів. Зазвичай оновлення містять ефемериди, з новими альманахами, які завантажуються рідше. Контрольний сегмент гарантує, що протягом нормальної роботи, нові альманахи завантажуються щонайменше кожні 6 днів. З його допомогою можна лише приблизно обчислити їхнє розташування.

Альманах постійно оновлюється, тому що передається кожним супутником, що входить до системи GPS. Час його актуальність складає 2-3 місяці. Це пов'язано з тим, що у роботу супутників щодня вносяться коригування, і після такого тривалого часу похибка буде надто великою.

Альманах супутникових систем представляє собою неоперативну інформацію у складі навігаційних повідомлень GNSS. Вона використовується приймальним обладнанням для початкового розрахунку положень супутників з метою більш швидкого захоплення їх сигналів і мінімізації інтервалу часу до одержання першого значення координат (TTFF – Time To First Fix). Після сеансу роботи альманах зберігається в пам'яті приймача для можливості наступного так званого «теплого старту» (warm start). Протилежним йому є «холодний старт» (cold start), коли альманах на момент ініціалізації невідомий, або відбулась значна зміна положення приймача після останнього робочого сеансу. Різниця в значенні TTFF для «теплого» і для «холодного» стартів може сягати 12-15 хвилин.[\[15\]](#)

Також дані альманаху використовуються для прогнозування геометричних факторів погіршення точності (GDOP – Geometrical Dilution of Precision), які впливають на якість навігаційних визначень. Попередньо створений прогноз GDOP дозволяє обрати найбільш сприятливий інтервал часу для проведення високоточних вимірювань, або принаймні уникнути пікових значень, коли несприятлива геометрія розташування навігаційних супутників над користувачем призведе до збільшення рівня помилок у визначенні його координат.

Частота оновлення даних альманаху різних супутникових систем у складі GNSS залежить від накопичення змін в орбітальних параметрах супутників, а також їх функціонального стану, для індикації якого використовується знак «здоров'я» (health). Зазвичай альманах оновлюється на рідше ніж один раз на тиждень. Для проведеного дослідження використовувалась база альманахів системи GPS (рис.2.1), доступна на ресурсі www.navcen.uscg.gov.

The image shows a screenshot of the Navigation Center website. The page title is "NAVIGATION CENTER" and it is part of the "U.S. Department of Homeland Security" and "UNITED STATES COAST GUARD". The page contains a navigation menu and a main content area. The main content area is titled "GPS ALMANAC SYMA FOR YEAR 2021" and displays a table of satellite data. The table has 10 columns, each representing a satellite ID (e.g., 001 ALM, 002 ALM, etc.). The table lists various parameters for each satellite, including their status and health. The table is organized into sections: "GPS", "Maritime Safety Data", "Nav Systems and Services", and "Maritime Safety Information".

GPS ALMANAC SYMA FOR YEAR 2021									
001 ALM	002 ALM	003 ALM	004 ALM	005 ALM	006 ALM	007 ALM	008 ALM	009 ALM	010 ALM
011 ALM	012 ALM	013 ALM	014 ALM	015 ALM	016 ALM	017 ALM	018 ALM	019 ALM	020 ALM
021 ALM	022 ALM	023 ALM	024 ALM	025 ALM	026 ALM	027 ALM	028 ALM	029 ALM	030 ALM
031 ALM	032 ALM	033 ALM	034 ALM	035 ALM	036 ALM	037 ALM	038 ALM	039 ALM	040 ALM
041 ALM	042 ALM	043 ALM	044 ALM	045 ALM	046 ALM	047 ALM	048 ALM	049 ALM	050 ALM
051 ALM	052 ALM	053 ALM	054 ALM	055 ALM	056 ALM	057 ALM	058 ALM	059 ALM	060 ALM
061 ALM	062 ALM	063 ALM	064 ALM	065 ALM	066 ALM	067 ALM	068 ALM	069 ALM	070 ALM
071 ALM	072 ALM	073 ALM	074 ALM	075 ALM	076 ALM	077 ALM	078 ALM	079 ALM	080 ALM
081 ALM	082 ALM	083 ALM	084 ALM	085 ALM	086 ALM	087 ALM	088 ALM	089 ALM	090 ALM
091 ALM	092 ALM	093 ALM	094 ALM	095 ALM	096 ALM	097 ALM	098 ALM	099 ALM	100 ALM
101 ALM	102 ALM	103 ALM	104 ALM	105 ALM	106 ALM	107 ALM	108 ALM	109 ALM	110 ALM
111 ALM	112 ALM	113 ALM	114 ALM	115 ALM	116 ALM	117 ALM	118 ALM	119 ALM	120 ALM
121 ALM	122 ALM	123 ALM	124 ALM	125 ALM	126 ALM	127 ALM	128 ALM	129 ALM	130 ALM
131 ALM	132 ALM	133 ALM	134 ALM	135 ALM	136 ALM	137 ALM	138 ALM	139 ALM	140 ALM
141 ALM	142 ALM	143 ALM	144 ALM	145 ALM	146 ALM	147 ALM	148 ALM	149 ALM	150 ALM
151 ALM	152 ALM	153 ALM	154 ALM	155 ALM	156 ALM	157 ALM	158 ALM	159 ALM	160 ALM
161 ALM	162 ALM	163 ALM	164 ALM	165 ALM	166 ALM	167 ALM	168 ALM	169 ALM	170 ALM
171 ALM	172 ALM	173 ALM	174 ALM	175 ALM	176 ALM	177 ALM	178 ALM	179 ALM	180 ALM
181 ALM	182 ALM	183 ALM	184 ALM	185 ALM	186 ALM	187 ALM	188 ALM	189 ALM	190 ALM
191 ALM	192 ALM	193 ALM	194 ALM	195 ALM	196 ALM	197 ALM	198 ALM	199 ALM	200 ALM
201 ALM	202 ALM	203 ALM	204 ALM	205 ALM	206 ALM	207 ALM	208 ALM	209 ALM	210 ALM
211 ALM	212 ALM	213 ALM	214 ALM	215 ALM	216 ALM	217 ALM	218 ALM	219 ALM	220 ALM
221 ALM	222 ALM	223 ALM	224 ALM	225 ALM	226 ALM	227 ALM	228 ALM	229 ALM	230 ALM
231 ALM	232 ALM	233 ALM	234 ALM	235 ALM	236 ALM	237 ALM	238 ALM	239 ALM	240 ALM
241 ALM	242 ALM	243 ALM	244 ALM	245 ALM	246 ALM	247 ALM	248 ALM	249 ALM	250 ALM
251 ALM	252 ALM	253 ALM	254 ALM	255 ALM	256 ALM	257 ALM	258 ALM	259 ALM	260 ALM
261 ALM	262 ALM	263 ALM	264 ALM	265 ALM	266 ALM	267 ALM	268 ALM	269 ALM	270 ALM
271 ALM	272 ALM	273 ALM	274 ALM	275 ALM	276 ALM	277 ALM	278 ALM	279 ALM	280 ALM
281 ALM	282 ALM	283 ALM	284 ALM	285 ALM	286 ALM	287 ALM	288 ALM	289 ALM	290 ALM
291 ALM	292 ALM	293 ALM	294 ALM	295 ALM	296 ALM	297 ALM	298 ALM	299 ALM	300 ALM
301 ALM	302 ALM	303 ALM	304 ALM	305 ALM	306 ALM	307 ALM	308 ALM	309 ALM	310 ALM
311 ALM	312 ALM	313 ALM	314 ALM	315 ALM	316 ALM	317 ALM	318 ALM	319 ALM	320 ALM
321 ALM	322 ALM	323 ALM	324 ALM	325 ALM	326 ALM	327 ALM	328 ALM	329 ALM	330 ALM

Рис.2.1. Приклад доступних альманахів [10]

Альманах — це підмножина супутникового годинника GPS та даних ефемерид зі зниженою точністю. CS надає GPS-альманах у двох форматах: YUMA та модель ефективності системи (SEM). Кожен формат альманаху розбитий на два файли. Файли YUMA називаються `current.alm` (PRN 1-32) і `current.blm` (PRN 1-63). Файли SEM називаються `current.al3` (PRN 1-32) і `current.bl3` (PRN 1-63). Альманах YUMA — це зручний для читання формат даних альманаху, тоді як формат SEM призначений як вхідні дані для програмних засобів.[16]

2.2.1 Формат альманаху SEM

Приклад файлу формату SEM на рисунку 2.2 упорядкований із заголовком, який ідентифікує кількість записів (кількість супутників) та назву файлу (`current.al3`). Існує додатковий файл SEM з розширенням імені файлу `.bl3`, ідентичним `.al3`, за винятком діапазону кількості записів, діапазону номерів PRN та поля номера SVN.

```

LINE
1 28 CURRENT.AL3
2 175 589824
3
R-1 1
R-2 32
R-3 1
R-4 0.54044723510742E-0002 b 0.95157623291016E-0002 c -0.25247572921216E-0008
R-5 0.51537275390625E+0004 d -0.12954437732697E+0000 e -0.54729294776917E+0000
R-6 0.21287477016449E+0000 f 0.26512145996094E-0003 g 0.00000000000000E+0000
R-7 0
R-8 9
R-9
1
2
.
.

```

Рис. 2.2. Зразок даних SEM для поточного `.alm3`

2.2.2 Формат альманаху YUMA

Параметри формату альманаху YUMA, які використовуються у форматі YUMA, відрізняються від параметрів формату SEM. Кутові одиниці YUMA вказані в радіанах, тоді як кутові одиниці SEM – півколами. Крім того, орбітальний нахил YUMA є прямою мірою кута нахилу (приблизно 55 градусів), тоді як зсув нахилу SEM дорівнює 0,30 півкола (54 градуси). Параметри альманаху YUMA визначаються в структурі повідомлення. Записи для ідентифікатора, здоров'я та тижня представлені у десятковому форматі. Рисунок 2.3 ілюструє один запис у зразку файлу `current.alm` YUMA Almanac. Максимальна кількість записів у файлі `current.alm` становить 32, і цей файл адресує PRN 1-32. Перший рядок кожного запису визначає тиждень, протягом якого був створений файл, а також номер PRN суб'єкта SV. Існує додатковий файл YUMA з розширенням імені файлу `.blm`, ідентичним `.alm`, за винятком того, що він адресує PRN 01-63, а діапазон кількості записів або ідентифікаційного номера у поточному файлі `.blm` становить 00-63.[\[17\]](#)

```

***** Week 175 almanac for PRN-01 *****
ID:                                01
Health:                            000
Eccentricity:                      0.5404472351E-002
Time of Applicability(s):          589824.0000
Orbital Inclination(rad):          0.9723724451
Rate of Right Ascen(r/s):          -0.7931758961E-008
SQRT(A) (m 1/2):                   5153.727539
Right Ascen at Week(rad):          -0.4069756641E+000
Argument of Perigee(rad):          -1.719371504
Mean Anom(rad):                    0.6687658141E+000
Af0 (s):                            0.2651214600E-003
Af1 (s/s):                          0.0000000000E+000
Week:                               175
                                     .
                                     .

```

Рис. 2.3. Зразок даних YUMA для поточного `.alm`

Формат даних альманаху Yuma для одного навігаційного супутника, що представлений у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Формат даних альманаху YUMA -дає інтерпретацію кожного параметра в YUMA альманах 1

Дані альманаху	Коментарі тексту даних альманаха
Week 130 almanac for PRN-01**	альманах 130 тижня для супутника №1
ID: 01	ідентифікаційний номер супутника
Health: 000	Здоров'я супутника
Eccentricity: 5.345344543E-003	Ексцентриситет орбіти супутника
Time of applicability(s): 503808.0000	Час задачі альманаху супутника з початку тижня (с)
Orbital Inclination(rad): 9.676626447E-001	Кут нахилу орбіти супутника (радіан)
Rate of Right Ascen(r/s): -7.80603943-009	Швидкість зміни кута прямого сходження (радіан/с)
SQRT(A) (m ^{1/2}): 5153.637695	Корінь квадратний з найбільшої півосі орбіти супутника (м ^{0.5})
Right Ascen to TOA(rad): -1.051855793E+000	Довгота висхідного вузла орбітальної площини на тижневу епоху (радіан)

Продовження таблиці 2.1 Формат даних альманаху YUMA

Argument of Perigee(rad): - 1.704181124E+000	Аргумент перигея (радіан)
Mean Anom(rad): 1.869637581E+000	Середня аномалія на час прив'язки (радіан)
Af0(s): 2.174377441E-004	Коефіцієнти корекції шкал часу супутників
Af1(s/s): 3.637978807E-012	
week: 130	Поточний тиждень

2.2.3 Генерація даних альманаху

GPS CS генерує дані альманаху для сузір'я GPS, два поточних альманахи формату системи ефективності (SEM) (current.al3 і current.bl3), два поточних альманахи формату YUMA (current.alm і current.blm) і один поточний альманах у форматі Extended Signals Health Status (ESHS) (current.ale). Супутникові дані SEM і YUMA альманах містять орбітальні параметри та параметри продуктивності для робочих супутників GPS. Дані супутникового альманаху ESHS містять стан здоров'я кожного з модернізованих цивільних сигналів, доступних для кожного SV – L1C, L2C та L5.

2.2.4 Обчислення координат за даними альманаху

Дані альманаху дозволяють обчислити вихідну оцінку координат супутника (1 – 2 км, похибка 1σ), необхідну для отримання сигналу приймач.

Дані альманаху складаються із зменшеного набору параметрів (по відношенню до ширококомвні ефемериди), як наведено в таблиці 3.11 для супутників GPS. Подібні транслуються дані для Galileo та BeiDou.

Таким чином, для обчислення можна використовувати рівняння просто взявши

$$\Delta n = i = C_{uc} = C_{us} = C_{rc} = C_{rs} = C_{ic} = C_{is} = 0 \quad (2.1)$$

У таблиці 2.3 наведено перелік ефемеридних параметрів трансляції GPS, Galileo або BeiDou для обчислення координат супутника в будь-яку епоху спостережень. Ці параметри періодично оновлюються (як правило, кожні дві години для GPS) і не повинні використовуватися після встановленого часу (близько чотирьох годин), оскільки помилка екстраполяції експоненціально зростає після цього періоду дії. Супутники Galileo і BeiDou працюють за тією ж схемою.

Таблиця 2.2

GPS/ Galileo/ BeiDou трансльовані ефемериди та параметри повідомлення
годинника

Параметр	Пояснення
t_{oe}	Ефемериди надсилаються до епохи в секундах протягом тижня
\sqrt{a}	Квадратний корінь з великої півосі
e	Ексцентриситет
M_o	Середня аномалія в еталонну епоху
ω	Аргумент перигею
i_o	Нахил епохи відліку

Продовження таблиці 2.2 GPS/ Galileo/ BeiDou трансльовані ефемериди та параметри повідомлення годинника

$\bar{\Omega}_o$	Довгота висхідного вузла на початку тижня
Δ_o	Середня різниця руху
i	Швидкість кута нахилу
$\bar{\Omega}$	Швидкість прямого вузла сходження
C_{uc}, C_{us}	Корекція аргументу широти

C_{rc}, C_{rs}	Корекція радіусу орбіти
C_{ic}, C_{is}	Корекція нахилу
a_0	Зсув супутникового годинника
a_1	Дрейф супутникового годинника
a_2	Швидкість дрейфу супутникового годинника

2.3 Дані ефемерид

Дані ефемериди подібні до даних альманаху, але дозволяють набагато точніше визначити позицію супутника, необхідного для перетворення затримки поширення сигналу в оцінку положення користувача. На відміну від даних альманаху, дані ефемерид для конкретного супутника транслюються тільки цим супутником, і дані дійсні трохи більше 4-6 годин.

Дані ефемерис містять дуже точні коригування параметрів орбіт і годинника для кожного супутника, що потрібно для точного визначення

координат. Кожен навігаційний супутник передає дані лише свого власного ефемеріс.

Інформацію про місцезнаходження супутників навігаційні приймачі отримують саме з даних, що містяться в альманахах та ефемерид супутників. Значення терміна «ефемериди» (др.-грец. — на день, щоденний). В астрономії це таблиця небесних координат Сонця, Місяця, планет та інших астрономічних об'єктів, обчислених через рівні проміжки часу, наприклад, на опівночі кожної доби.

Також ефемеридами називають координати штучних супутників Землі, що використовуються для навігації в системах NAVSTAR (GPS), ГЛОНАСС, Galileo та ін.

Ефемериди - це уточнена інформація про орбіту даного конкретного супутника, що передає сигнал, оскільки реальна орбіта супутника може відрізнитися від розрахункової. Саме точні дані про поточне положення супутників дозволяють навігаційному приймачеві обчислювати точне розташування супутника і на цій основі розраховувати власне розташування.

На відміну від альманаху, кожен супутник передає дані лише свого власного ефемеріс, і з їх допомогою навігаційний приймач з високою точністю може визначити місцезнаходження супутників.

Ефемериди, що несуть більш точні дані, старіють достатньо скоро. Дані дійсні тільки 30 хв. Супутники передають свій ефемеріс кожні 30 секунд.

Відновлення ефемерид виконується наземними станціями. Якщо приймач було вимкнено більше 30 хв, а потім включений, то він починає шукати супутники, спираючись на відомий йому альманах. Він підбирає супутники для ініціації пошуку.

Коли навігаційний приймач фіксує супутник, йде процес збору даних ефемеріс. Коли ефемеріс кожного супутника прийнято, дані, прийняті від супутника, вважаються придатними для навігації.

Якщо живлення приймача відключити, а потім знову включити протягом 30 хв, він «ловить» супутники дуже швидко, оскільки не потрібно буде знову збирати дані ефемери. Це «гарячий» старт.

Якщо після відключення пройшло більше 30 хв, то буде здійснено «теплий» старт, і приймач знову почне збирати дані ефемеріс.

Якщо приймач був перевезений (у вимкненому стані) на кілька сотень кілометрів або внутрішній годинник став показувати неточний час, то дані наявного альманаху є невірними. У такому випадку навігатору потрібно виконати завантаження нового альманаху та ефемеріс. Це вже буде "холодний" старт.

Забезпечення супутників ефемеридами виробляє наземний сегмент системи. Тобто з Землі визначаються параметри руху супутників і прогнозуються значення цих параметрів на заздалегідь певний проміжок часу. Вимірювання та прогноз параметрів руху НКА проводяться у балістичному центрі системи за результатами траєкторних вимірювань дальності до супутника та його радіальної швидкості. Параметри та їх прогноз закладаються в навігаційне повідомлення, яке передається супутником поряд із передачею навігаційного сигналу.

Визначити, який із стартів використовується в даний момент, дуже просто: якщо ви включаєте приймач вперше за 3 місяці, то це буде «холодний старт», якщо з моменту останнього використання пристрою пройшло більше 6 годин, то це буде «теплий старт», якщо менше 4 годин, то гарячий.

Час «старту» необхідне навігаційному приймачеві визначення позиції після включення, залежить від наявної у пам'яті початкової інформації.

Виділяються такі режими:

- «Холодний» старт («автопошук») – час, позиція, альманах та ефемерида невідомі

- «Теплий» старт – позиція та ефемериди невідомі, час та альманах відомі
- «Гарячий» старт («перезахоплення») – альманах, ефемериди відомі, час та позиція відомі з деякою помилкою

Прийом сигналів інформації даних ефемерид та альманаху, що передається із супутників, постійно коригується. Це відбувається один раз (а за потреби і більше) на добу. Мережа наземних станцій, отримує інформацію з супутників, за аналогією зі звичайними користувачами, аналізує вимірювання, порівнює їх з опорними, розраховує коригувальні поправки та передає їх на головну станцію, з якої здійснюється передача даних на супутники.

Холодний старт приймача може бути пов'язаний не тільки з його тривалою бездіяльністю, але переміщенням на велику відстань у вимкненому стані. Якщо перший випадок пов'язаний із застарілим альманахом та помилкою у визначенні поточного точного часу, то у другому випадку приймач, не знаючи про своє переміщення, намагатиметься знайти супутники, яких мають бути видимі на «старому» місці. Користувач може "допомогти" приймачеві і зменшити час "холодного" старту, вказавши на базовій карті, зразкове "нове" розташування.[\[18\]](#)

Під час холодного старту приймач сканує весь діапазон можливих значень частот і тимчасових затримок навігаційних сигналів. При цьому в багатоканальних приймачах кілька каналів можуть використовуватися для пошуку одного супутника, щоб прискорити час його захоплення. Після того, як сигнал хоча б від одного супутника буде отримано та розібрано, приймач матиме повну інформацію про альманаху всього угруповання і, по суті, перейде до «теплого» старту.

При "теплому" старті, приймач, включений після 6-ї години бездіяльності, почне "пошук" сигналів супутників, використовуючи значення поточного часу та дані, що зберігається в пам'яті, альманаху. Здійснюватиметься пошук тільки

тих супутників, яких, за теоретичними розрахунками, знаходяться у видимій півкулі і повинні бути доступні приймачеві. Відповідно, відомий досить вузький діапазон частот та тимчасовий затримок, який потрібно просканувати у процесі пошуку сигналів. Ця інформація суттєво прискорює час захоплення супутників у порівнянні з «холодним» стартом, коли пошук ведеться на широкому діапазоні всіх можливих значень затримок та частот.

У приймачах Garmin для контролю поточного використання супутників існує сторінка Satellites, на якій відображається інформація про місцезнаходження супутників та індикатор рівня сигналу. Коли супутник лише захоплений, але ще не використовується у підрахунку позиції, цей індикатор має прозорий вигляд. Після того, як ефемериди повністю отримані та декодовані, супутник може використовуватись у підрахунку позиції.

Варто зазначити, що в момент включення багатоканальний приймача починає пошук сигналів з декількох супутників одночасно. Інформація, що передається з супутників, прив'язана до єдиної шкали часу, містить однакову структуру і досягає антени приймача, приблизно в один і той же час. Тому дані ефемерид, одночасно захоплених супутників, надійдуть до приймача майже одночасно. Якщо кількість таких супутників більше або дорівнює трьом, це дозволяє приймачеві відразу ж розрахувати позицію. У випадку, коли сигнали блокуються високими будівлями або густим листям, може знадобитися досить тривалий час на визначення позиції. [19]

Наявність повністю отриманих ефемерид не гарантує використання цього супутника у підрахунку позиції. Інформація, що передається в ефемеридах, може бути неправильною, помилковою, або пов'язаною з несправністю в роботі супутника. У цьому випадку, індикатора «здоров'я», що передаються в даних ефемерид та альманаху, інформує приймач, що сигнали з цього супутника не можна використовувати в підрахунку позиції. Це може бути пов'язано не тільки з несправністю супутника, але й діагностичними роботами, що проводяться на

його борту, процесом введення його в експлуатацію або тестуванням нових режимів.

«Гарячий» старт пов'язаний з короткочасним вимкненням приймача (до 6-ї години) не вимагає тривалого часу на визначення позиції. Це тим, що отримані раніше ефемериди містять «свіжі» дані, використовувані визначення точних координат супутників і можуть використовувати у обчисленні позиції. У разі включення приладу після порогового часу ефемериди розглядаються застарілими і починає діяти принцип «теплого» старту. Якщо на момент включення приймача видимими залишилися менше 3 супутників зі «свіжими» ефемеридами, то для визначення позиції знадобиться деякий час на збір даних ефемерид нового супутника.

Дані ефемерид передаються у складі трьох пакетів. Кожен із пакетів містить однаковий часовий ідентифікатор (IOD – issue of data) яким можна об'єднати загальну інформацію. Інформація ефемерид, що передається з супутників кожні 30 секунд, змінюється раз на 2 години і містить однаковий на цей час IOD. Якщо один з пакетів був пропущений, або отриманий з помилками, то можна виділити аналогічний пакет з наступного повідомлення, перевірити його ідентифікатор і не чекаючи на наступні пакети, використовувати його з раніше отриманими. Це дозволяє приймачеві прискорити час "старту".

Існує мінімальний можливий час, необхідний приймачеві на «старт», і це визначається структурою сигналу, що передається з супутників. Виробники навігаційної апаратури, використовуючи стандартні методи навігації, можуть наблизитись до цього часу, але зменшити його не зможуть. Одним із методів, призначених для вирішення цієї проблеми, є Assisted-GPS (A-GPS). Його принцип полягає в обчисленні точного розташування супутників без інформації ефемерид, на отриманні яких потрібен час. Обчислення складає використання точних моделей орбіт супутників, доступних через спеціальні Інтернет - сервіси.

З іншого боку, максимальний час «старту» може значно перевищувати заявлений у техніці на навігатор час. Це навколишніми умовами, у яких відбувається «захоплення» супутників і «старт» приймача. Якщо приймач знаходиться в умовах сильної багатопроменевості, викликаній густим листям дерев, або близькими будівлями, то навігаційний сигнал піддається зовнішньому впливу, містить помилки і неправильно декодується. В умовах міських «каньйонів», коли над приймачем «нависають» високі будівлі і видно лише невеликий сектор неба, кількість супутників, доступних для використання, різко обмежується. Більш того, геометричний фактор цих супутників, що є одним з критеріїв точно визначення позиції, сильно погіршується. Всі ці умови можуть значно збільшити час "старту" приймача.

У GPS альманах в комплексі з іншими полями даних передається кожні 12,5 хв, ГЛОНАСС - кожні 2,5 хв. У табл. 2.2 для порівняння наведено два часові параметри альманаху та ефемерисів GPS. Очевидно, що період оновлення даних та термін їх актуальності для альманаху та ефемерис істотно різні.

Таблиця 2.3

Періоди оновлення даних орбіт навігаційних супутників

Вид даних	Період оновлення даних	Актуальність інформації
Альманах	12,5 хв	декілька місяців
Ефемерис	30 с	30 хв

2.3.1 Помилки передбачення ефемерид

Дані ефемериди необхідні як для псевдодальності, так і для фазових обчислень. Ці помилки виникають через неправильну оцінку ефемериди супутників на GPS. Модель для їх оцінки похибки виходить при розгляді трьох компонентів вектора, що представляє різницю між оціненим і істинним відстань: вздовж колії (АТК), поперек колії (ХТК) і радіальна (РАД). Максимальна помилка спостерігається, коли супутник має піднесення 0° на горизонті приймача та лінії видимості (LOS) супутник користувача лежить на геометричній площині, що містить АТК.

Загалом, помилку можна виразити як функцію трьох компоненти, у вигляді:

$$ERR = RAD\cos\alpha + ATK\sin\alpha\cos\beta + XTK\sin\alpha\sin\beta, \quad (2.2)$$

де α – кут між супутником користувача LOS та супутник по вертикалі і β є кутом між напрямком АТК і площину, що містить LOS і супутникову вертикаль. Точна ефемерида Міністерства оборони США розраховується на основі фактичних спостережень на супутниках із мережі наземних станцій, розподілених навколо світу. Виробляється через кілька днів після спостереження період і доступний лише авторизованим користувачам. Інші, які не належать до DoD організації виробляють точні ефемериди як у всьому світі, так і в локально, шляхом відповідного моделювання всіх діючих сил і моментів супутники. Можна розробити методику релаксації орбіти в програмному забезпеченні GNSS. Ці методи усувають орбітальні помилки в ефемеридах трансляції і виробляють покращені відн позиціонування.

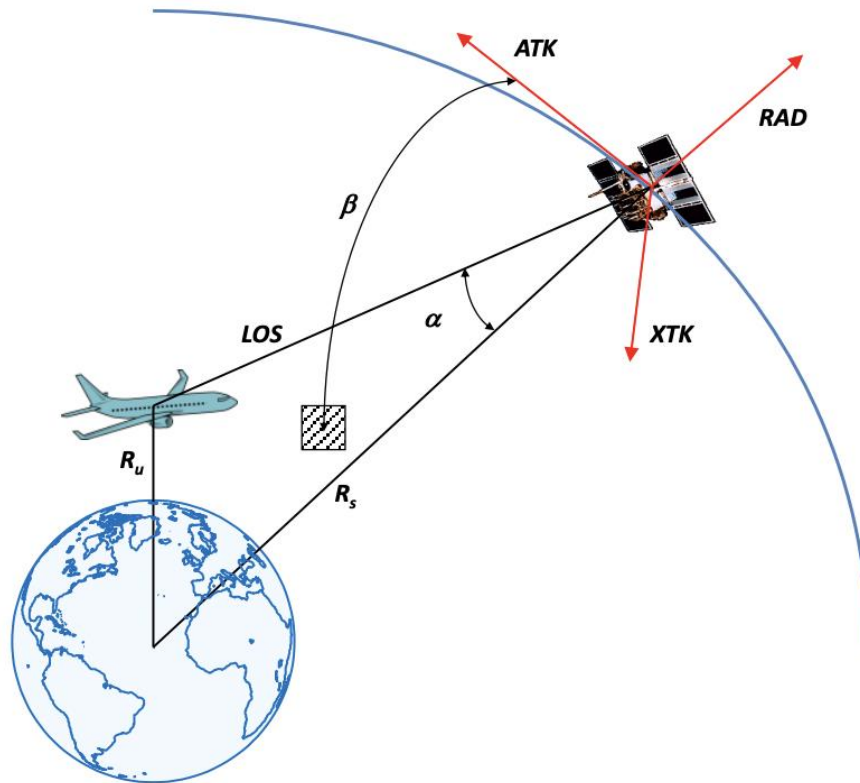


Рис. 2.4. Компоненти помилки в оцінці ефемерид

2.4 Геометричне зниження точності

Для оцінки впливу взаємного розташування супутників та приймача СНР на точність визначення координат використовується величина DOP – Dilution of Precision (Геометричне зниження точності). Це безрозмірна величина, яка характеризує геометричний фактор і показує, що скільки разів точність визначення координат гірша, ніж точність виміру псевдодальності. У наведеному вище прикладі для площини (з кутом 30° між лініями положення) DOP дорівнював би 2. Що стосується СНР, де визначається просторове місце літака і використовуються чотири поверхні положення, дещо складніше, але сенс залишається тим самим. [20]

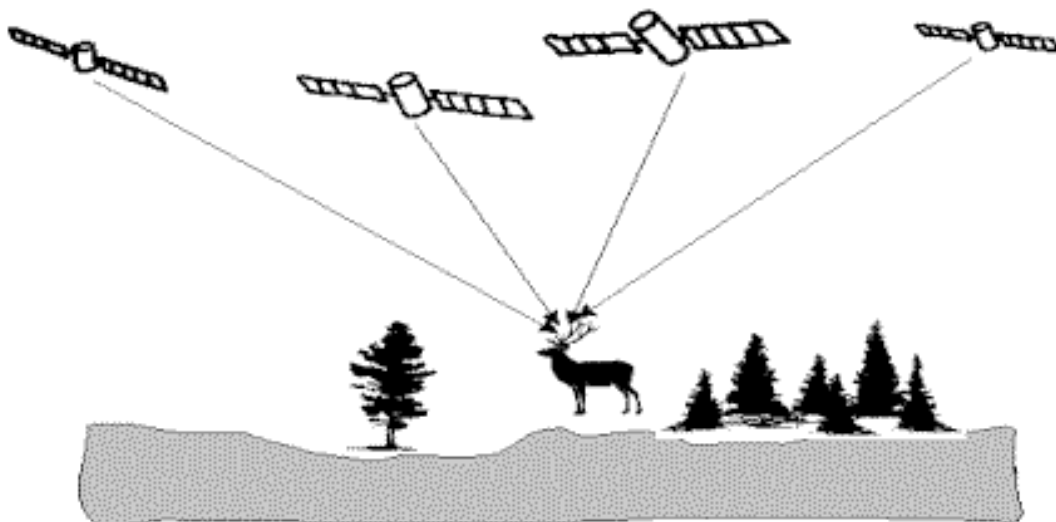


Рис. 2.5. Приклад хорошого розведення точності

Деякі зовнішні джерела вносять помилки в позицію GPS (або іншу супутникову навігацію), оцінену приймачем GPS. Одним із важливих факторів визначення точності позиціонування є сузір'я, або геометрія, групи супутників, з яких приймаються сигнали. Індикатором якості геометрії сузір'я супутника є Dilution of Precision або DOP. DOP залежить лише від положення супутників: скільки супутників ви можете побачити, як високо вони знаходяться в небі, і пеленг до них. Це часто називають геометрією.

Обчислене положення може змінюватися в залежності від того, які супутники використовуються для вимірювання. Різні геометрії супутника можуть збільшити або зменшити похибку розташування. Більший кут між супутниками знижує DOP і забезпечує кращі вимірювання (Рис. 2.5). Вищий DOP вказує на погану геометрію супутника (Рис. 2.6) і нижчу конфігурацію вимірювань, або іншими словами: чим нижче значення, тим вище впевненість у розв'язанні.

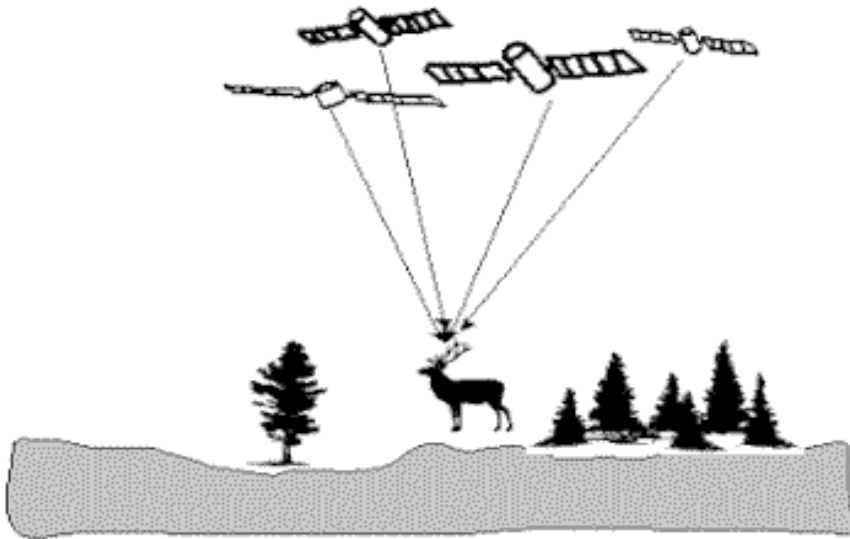


Рис. 2.6. Приклад поганого розведення точності

Розведення компонентів Precision

DOP часто поділяють на компоненти. Ці компоненти використовуються, оскільки точність системи GPS різна. Супутники рухаються, тому геометрія змінюється з часом, але вона дуже передбачувана.

GDOP обчислюється на основі геометричних відносин між положенням приймача та положеннями супутників, які приймач використовує для навігації.

Компоненти GDOP:

PDOP = Position Dilution of Precision (3-D), іноді сферичне DOP

HDOP = горизонтальний DOP (широта, довгота)

VDOP = вертикальне розведення точності (висота)

TDOP = час DOP (час)

Хоча кожен із цих термінів GDOP можна обчислити окремо, вони формуються з коваріацій і тому не є незалежними один від одного. Наприклад, високий TDOP (часове розведення точності) спричинить помилки годинника приймача, що в кінцевому підсумку призведе до збільшення помилок позиції.

Хороший GDOP, невелике значення, що представляє велику одиницю-вектор-об'єм, є результатом, коли кути від приймача до супутників різні. У той

час як поганий GDOP, велике значення, що представляє малу одиницю векторного об'єму, є результатом, коли кути від приймача до набору використовуваних SV подібні.

Згруповані супутники дають погані значення GDOP.

Правило таке: чим вище DOP, тим слабша геометрія.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

У другому розділі було розглянуто навігаційні повідомлення супутників, яких типів вони бувають та для яких цілей використовуються. Серед яких альманах - було розглянуто які формати альманаху існують та яку інформацію містять. Додатково було досліджено ефемериди, їхню ціль використання, режими, тощо.

Також було розглянуто геометричне зниження точності, що це за величина та які компоненти в собі складає.

РОЗДІЛ 3

МЕТОДИ ПРОГНОЗУВАННЯ ДОСТУПНОСТІ НАВІГАЦІЙНИХ СУПУТНИКІВ

3.1 Поняття доступність

Доступність навігаційної системи – це відсоток часу, протягом якого навігатор може використовувати послуги системи. Доступність – це показник здатності системи надавати корисні послуги в межах зазначеної зони покриття. Доступність сигналу – це відсоток часу, протягом якого навігаційні сигнали, передані із зовнішніх джерел, доступні для використання. Це залежить як від фізичних характеристик середовища, так і від технічних можливостей передавача.

3.2 Вимірювання доступності

Доступність зазвичай вимірюється у відсотках. Доступність буде виражати відсоток часу, протягом якого система може використовуватися одержувачем, користувачем або програмою.

Конкретизацію концепції доступності можна зробити, враховуючи доступність сигналу, який можна використовувати з конкретного супутника або враховуючи доступність позиції, швидкості та часу (PVT) з повної сузір'я[2].

Наявність придатного для використання сигналу від конкретного супутника пов'язана з правильною поведінкою супутника. Наявність доступного для використання сигналу для супутника лише гарантує, що псевдодальність супутника буде відома. Для наявності PVT необхідно, щоб можна було зробити блокування за сигналом щонайменше 3 супутників (для 2D позиціонування плюс час).

При розгляді доступності PVT можна додати додаткові обмеження, щоб визначити, коли система буде доступна. Якщо конкретна програма вимагає, щоб PVT можна було використовувати, лише якщо очікувана помилка нижче певного порогу, можна сказати, що система доступна лише тоді, коли помилка відповідає цій вимозі. Цей підхід матиме сенс лише в тому випадку, якщо система підтримує цілісність або якщо є еталонна система для вимірювання помилок. Інакше програма не може визначити, чи порушено поріг чи ні.

На доступність можуть вплинути кілька факторів, з яких найважливішими є конфігурація сузір'я та його видимість у місці розташування користувача та навколишнього середовища (будівлі та інші перешкоди), які можуть маскувати частину або всі супутники в небі.

Дослідження виконані за допомогою модифікованої програми PLANNING. Модифікація дозволила оцінювати потенційні характеристики СРНС, що складається з 29 супутників GPS, 16 супутників ГЛОНАСС, 27 супутників GALILEO. Для систем GPS і ГЛОНАСС, які зараз перебувають у робочому стані, застосовувалися дані альманаху безпосередньо прийняті з навігаційних супутників. [21]

Система GALILEO має на орбітах обмежену кількість супутників. Тому за відомою топологією системи GALILEO ми сформувавши повноцінний альманах 27 супутників, який використовується у дослідженні. Зазначимо також, що до цієї програми підключено 1 китайський супутник системи COMPASS та геостационарні супутники систем WAAS та EGNOS. Однак у розрахунках ці супутники не беруть участі.

Досліджується інтегральний показник просторового геометричного фактора (PDOP) при заданих координатах точки спостереження в часовому інтервалі 12 годин. Фізичний зміст цього показника зводиться до наступного – що менше його значення, то точніше визначатимуться координати споживача. Типове значення PDOP має бути менше 2.5 – 3.5.

3.2.1 Програма PLANNING

Далі наводиться послідовність процедур під час виконання програми PLANNING.

- Завантаження даних альманаху супутникових систем навігації

The image shows a 'Station Editor' dialog box with the following fields and controls:

- Station Name:** Kyiv NAU
- Position:**
 - Latitude: N 50° 30'
 - Longitude: E 30° 30'
 - Height: 215 [m]
 - Elevation Cutoff: 10'
- Time:**
 - Start Date: 13.11.2021
 - Start Time: 00:00
 - Duration: 12 [h]
 - Interval: 5 [min]
- Time Zone:** ??????? (????)
DST Difference GMT: 4.0 [h]

Buttons on the right: OK, Cancel, Apply, Delete, Obstacles..., Map..., City..., Today, Time Zone...

Рис. 3.1. Встановлення позиції

У цьому вікні (рис. 3.1) встановлюється позиція точки спостереження, дата, часовий діапазон та дискретність відліків часу.

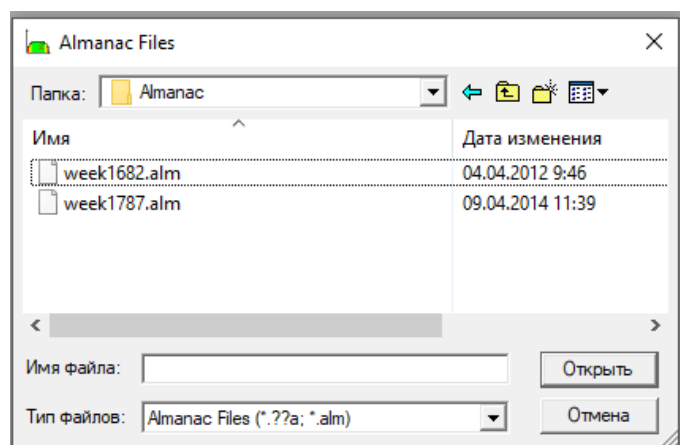


Рис. 3.2. Завантаження альманаха GPS, GLONASS, COMPASS

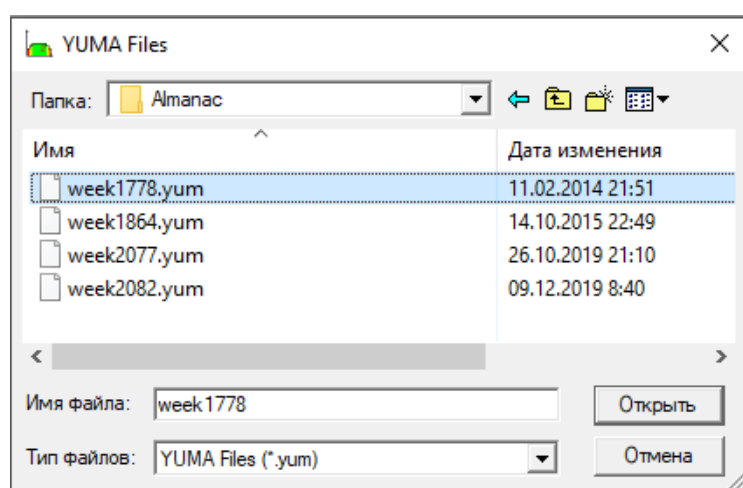


Рис. 3.3. Завантаження альманаха GALILEO

Через вікна (рис. 3.2, рис. 3.3) виконується завантаження альманахів у PLANNING.

Вікна, зображені на рис. 3.4 – 3.8 дозволяють регулювати типи систем та номери навігаційних супутників, що у вирішенні завдання.

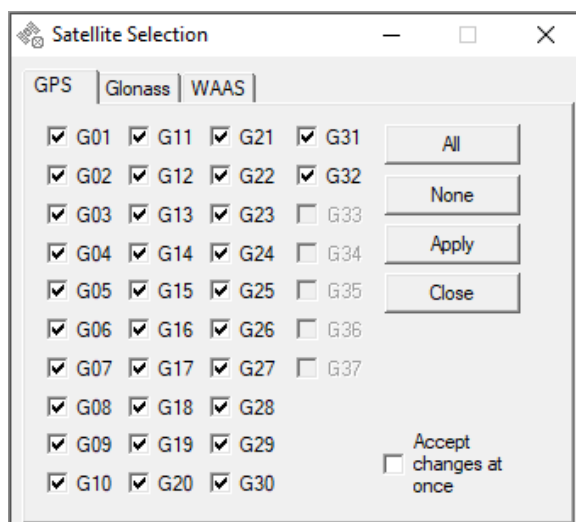


Рис. 3.4. Завантажені супутники GPS

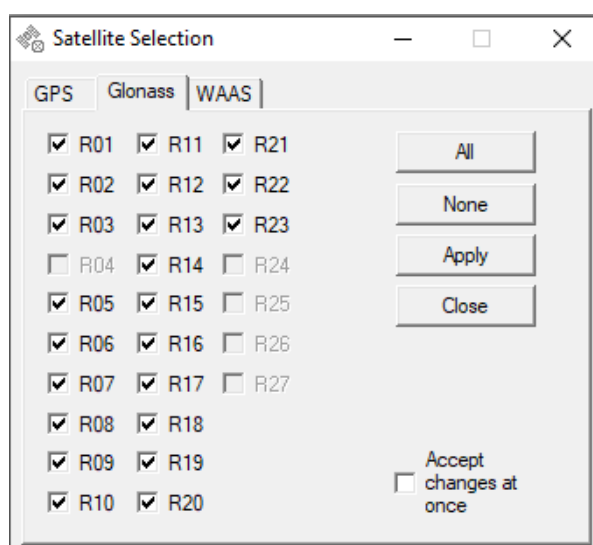


Рис. 3.5. Завантажені супутники GLONASS

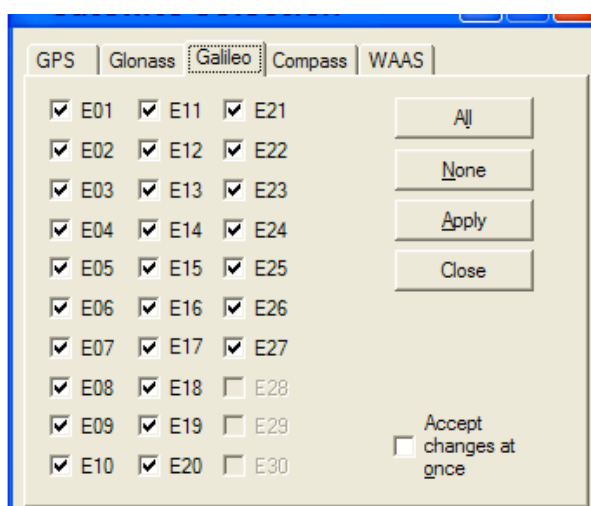


Рис. 3.6. Завантажені супутники GALILEO

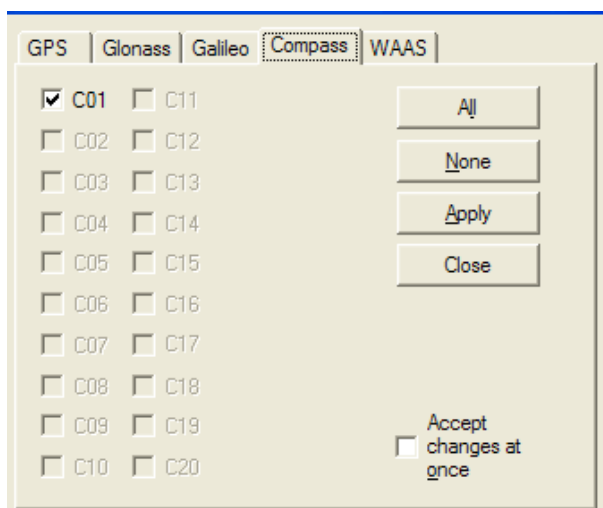


Рис. 3.7. Завантажені супутник COMPASS

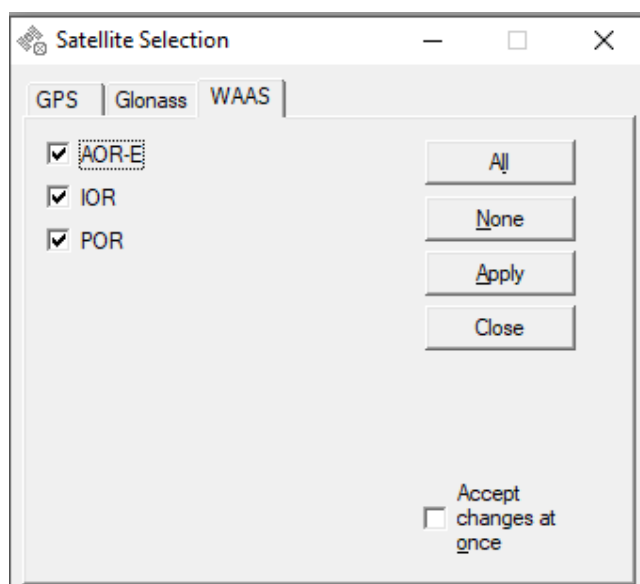


Рис. 3.8. Завантажені геостационарні супутники

- Видимість навігаційних супутників

Рішення про видимість навігаційних супутників з точки спостереження на інтервалі часу 12 годин для кожної із супутникових систем наведено на рис. 3. 9 – 3. 12.

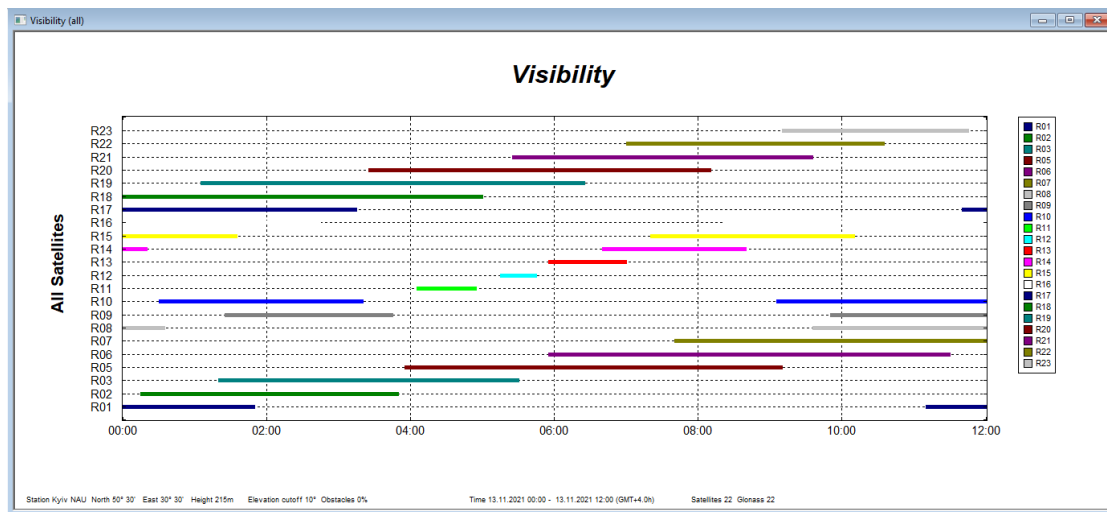


Рис. 3.9. Видимість супутників Glonass

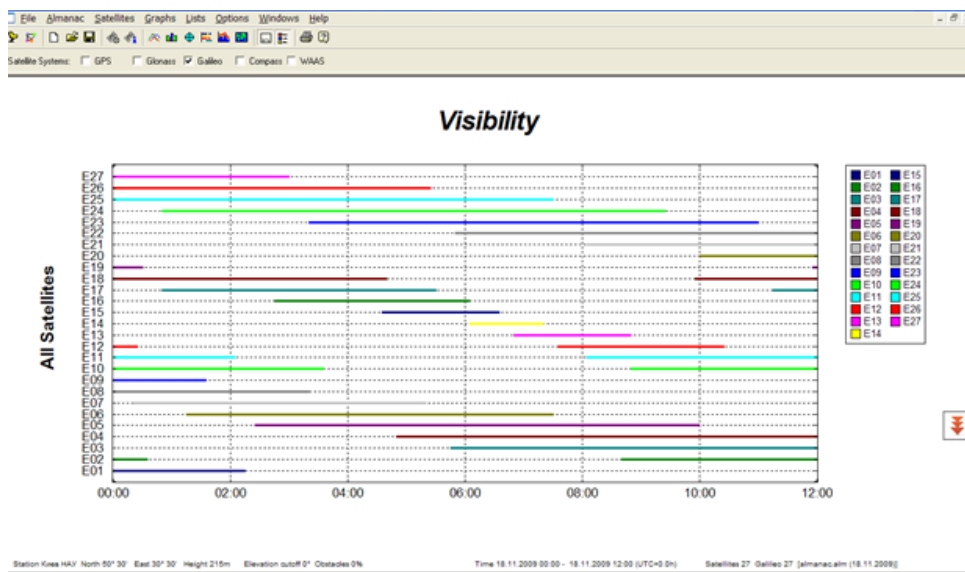


Рис. 1.10. Видимість супутників GALILEO

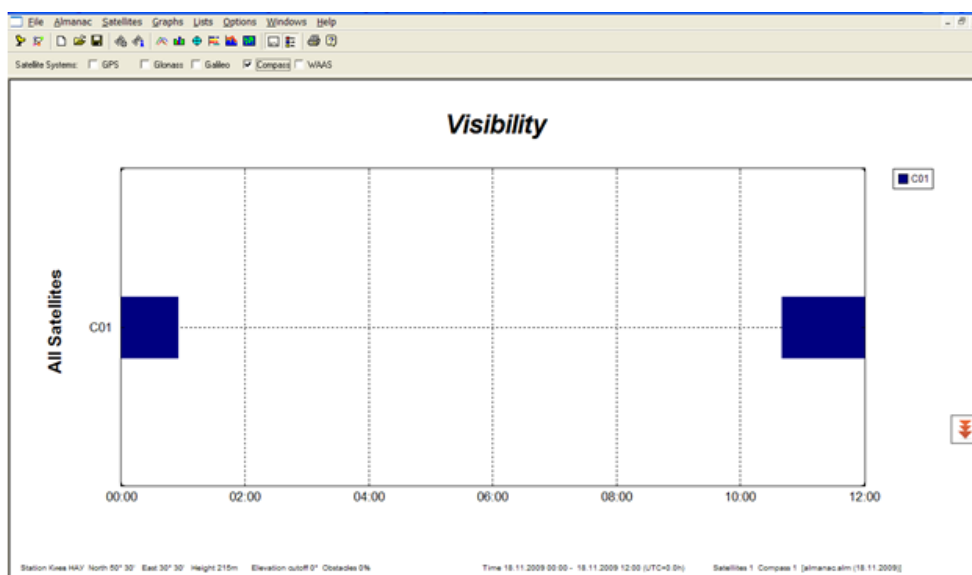


Рис. 3.11. Видимість супутника COMPASS

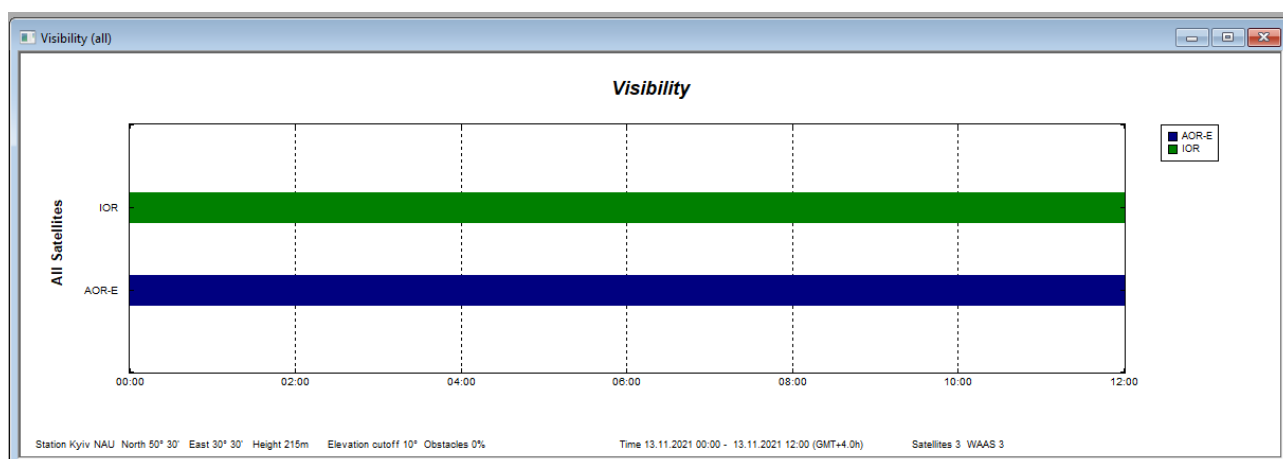


Рис. 3.12. Видимість геостаціонарних супутників

- Геометричні чинники супутникових навігаційних систем зображено на рис.3. 13 - 3. 16.

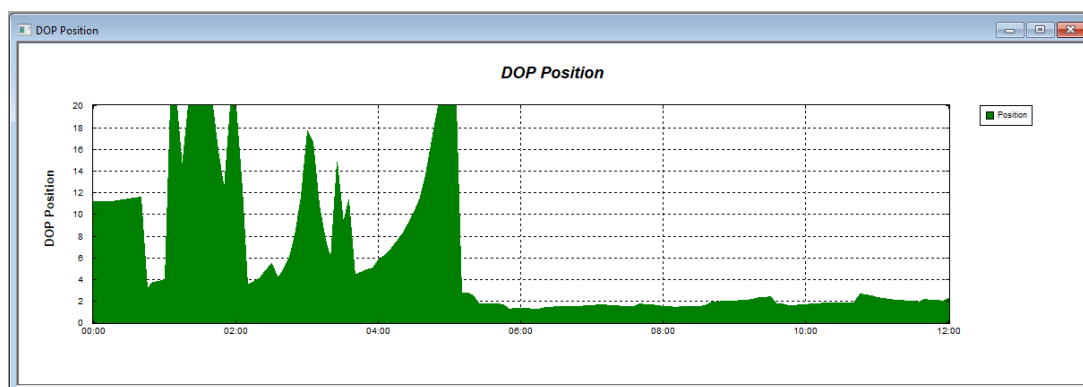


Рис. 3.13. Просторовий геометричний фактор GPS

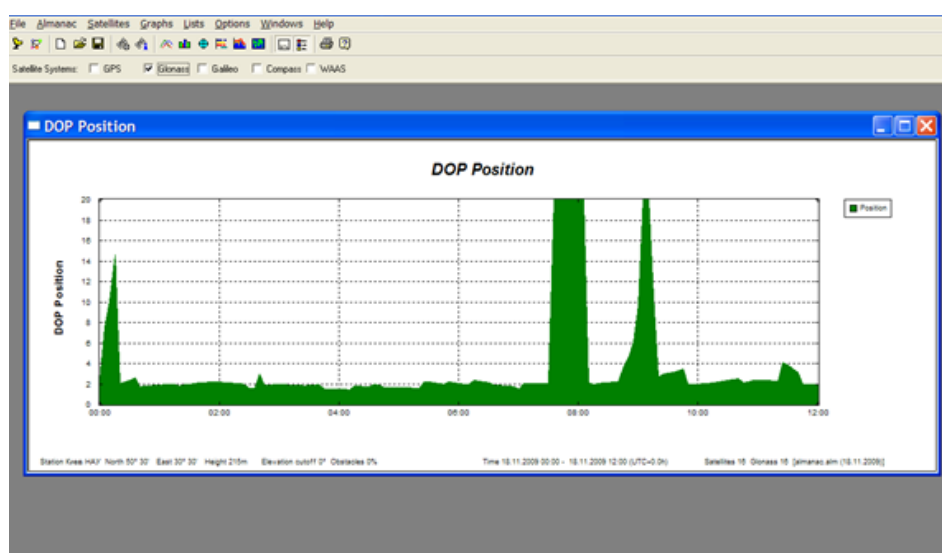


Рис. 3.14. Просторовий геометричний фактор GLONASS

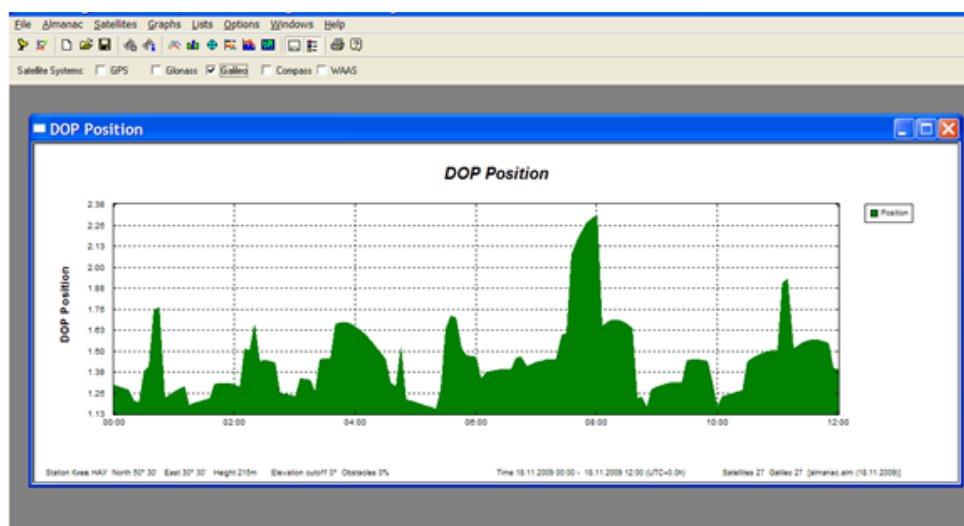


Рис. 3.15. Просторовий геометричний фактор GALILEO

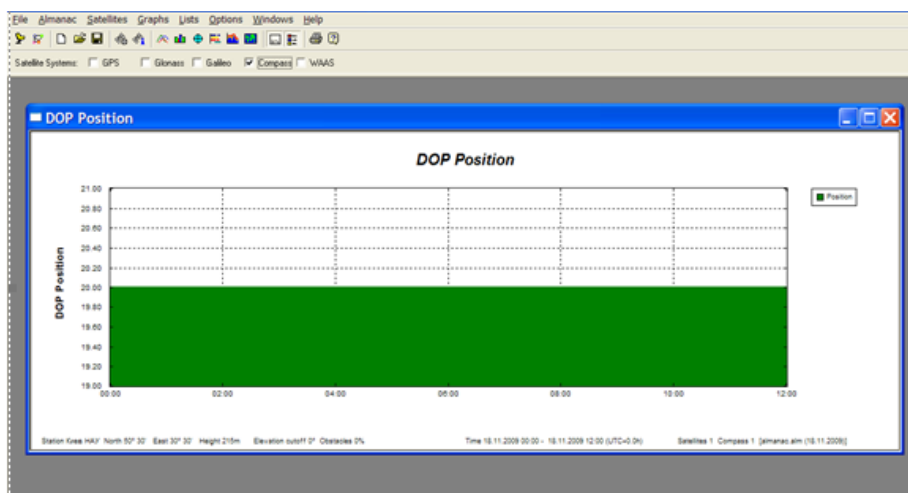


Рис. 1.16. Система COMPASS немає вимірювань

Наведені результати показують, що найкращі геометричні фактори мають повномасштабні системи GPS та GALILEO.

- Геометричні фактори при сумісному застосуванні систем

Геометричні чинники комбінацій систем показано на рис. 3. 18 - 3. 22.

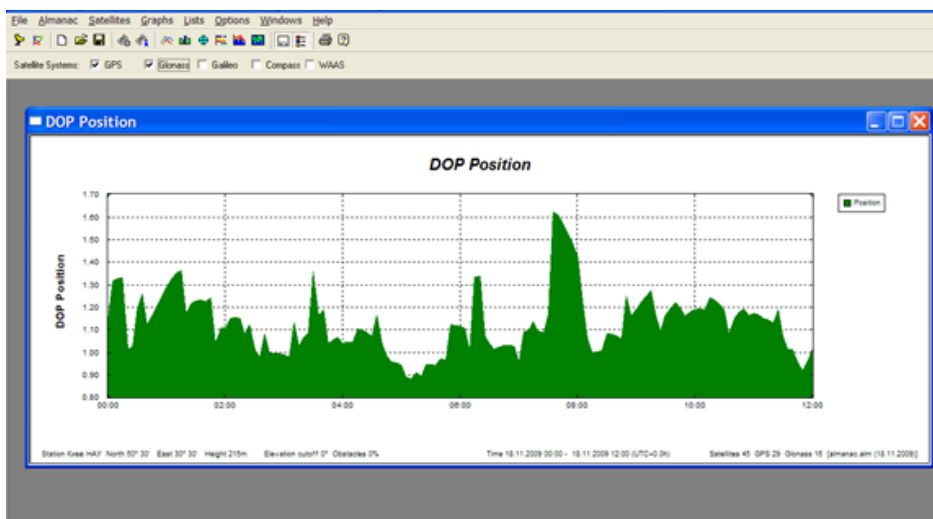


Рис. 3.17. Просторовий геометричний фактор GPS + GLONASS

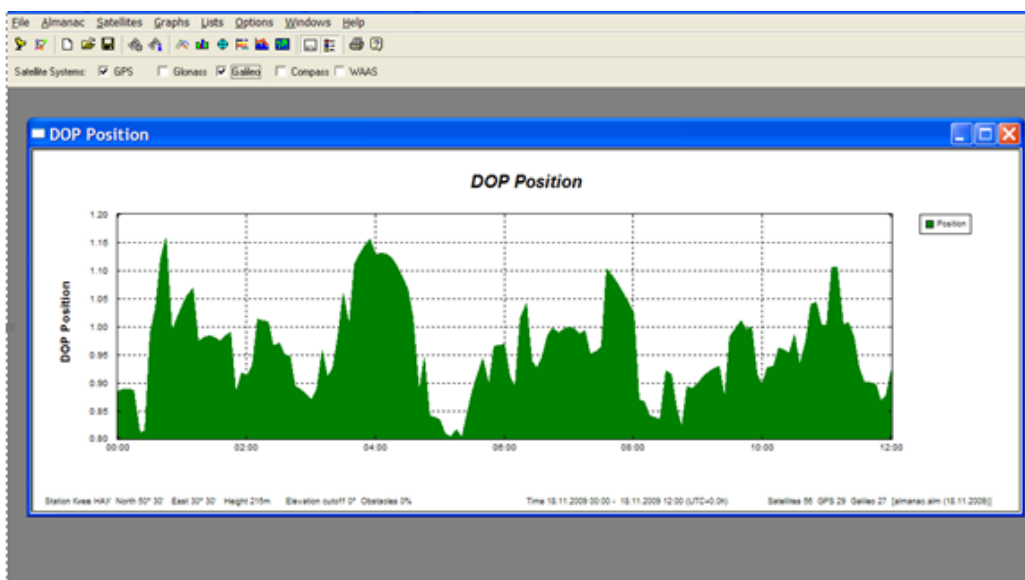


Рис. 3.18. Просторовий геометричний фактор GPS+GALILEO

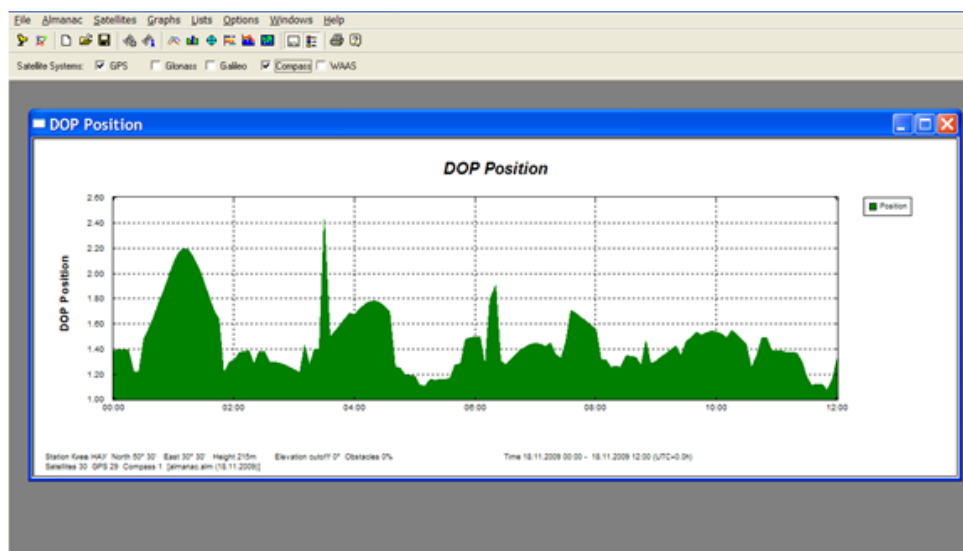


Рис. 3.19. Просторовий геометричний фактор GPS+COMPASS

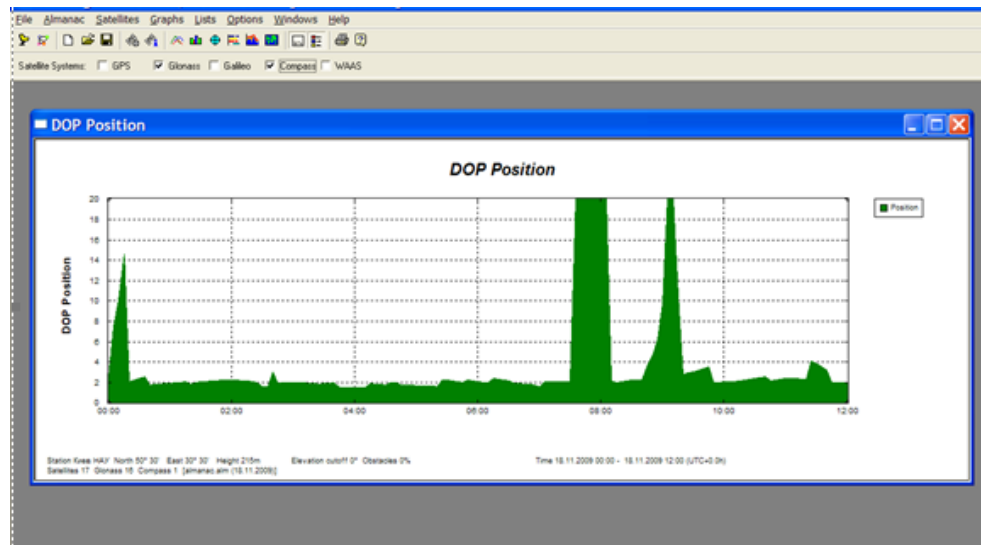


Рис. 3.20. Просторовий геометричний фактор GLONASS+COMPASS

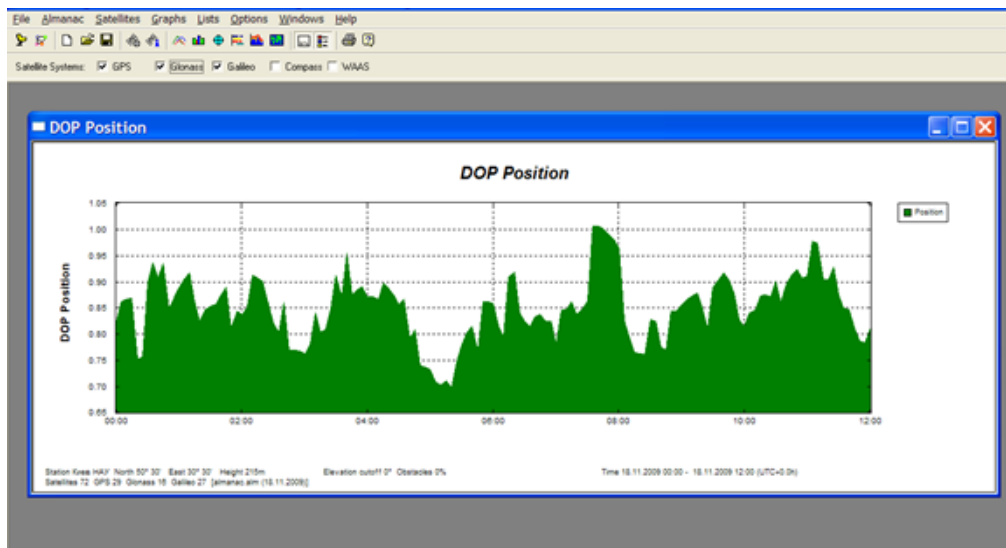


Рис. 3.21. Просторовий геометричний фактор GPS+GLONASS+GALILEO

Основний висновок із наведеного дослідження: застосування комбінацій різних супутникових систем призводить до зменшення геометричного фактора, а відтак підвищує точність визначення координат.

3.2.2 GNSS planning online

Також існує онлайн сервіс, куди можна внести необхідні дані та отримати точні результати дослідження. [22]

Для виконання дипломного проекту ми застосували програмне забезпечення GNSS Planning для запису навігаційного повідомлення та подальшої роботи з ним.

В бібліотеці сервісу є доступними декілька супутникових навігаційних систем. На даний момент бібліотека містить інформацію про 132 супутники. З них 129 – здорові. Жоден із них не має застарілого альманаху.

Є можливість вибрати супутникові системи або окремі супутники для використання в цій програмі.

Щоб почати роботу із сервісом треба вибрати необхідну інформацію (рис. 3.22), таку як: широту, довготу, висоту, кут маски, дату, час, період та часовий пояс.

Ри

с. 3.22. Налаштування вхідних даних сервісу GNSS Planning

Додатково є можливість вибрати супутникову навігаційну систему, що

буде використовуватись у дослідженні:

Satellite Selection			
Change selection			
Satellites: 30/132			
System: active		Satellites	
		Selected	Healthy
GPS	<input checked="" type="checkbox"/>	30	30
GLONASS	<input type="checkbox"/>	0	23
Galileo	<input type="checkbox"/>	0	23
BeiDou	<input type="checkbox"/>	0	49
QZSS	<input type="checkbox"/>	0	4

Рисунок 3.23. Налаштування СНС сервісу GNSS Planning

Сервіс використовує найновіший альманах:

My Settings	
Change settings	
Time of almanac:	2021-12-15
Time zone:	UTC +00:00
Visible period:	2021-12-15 00:00 - 2021-12-16 00:00
Latitude:	N 50° 22' 55.164"
Longitude:	E 30° 27' 46.9148"
Height:	500 m
Elevation cutoff:	5 °

Рис. 3.24. Інформація про вхідні дані дослідження з сервісом GNSS Planning

За допомогою цього сервісу можна отримати інформацію про видимість навігаційних супутників, просторовий геометричний фактор, висоту, кількість супутників, іоносферну інформацію та будує карту (рис. 3.25) розташування конкретних супутників на певному проміжку часу та за певними координатами.

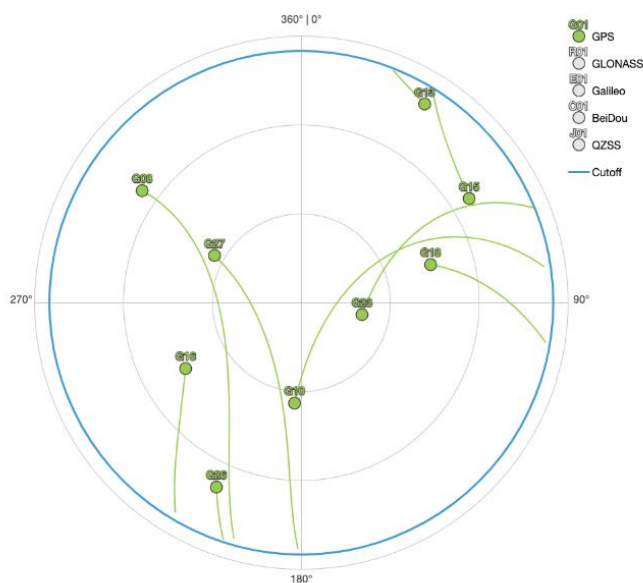


Рис. 3.25. Карта положення супутників

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

У цьому розділі було описано детальніше термін доступності, а також вимірювання доступності.

У даному розділі було розглянуто також методи прогнозування доступності навігаційних супутників, що були використані у дослідженні. Загалом було виконано дві програми PLANNING та GNSS Planning online.

Завдяки цим програмам ми отримали широкий перелік інформаційних даних, що ми можемо використати для прогнозування положення супутників.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА ВПЛИВУ ІНТЕРВАЛУ ОБНОВЛЕННЯ СУПУТНИКОВИХ ДАНИХ НА ТОЧНІСТЬ НАВІГАЦІЙНИХ ВИЗНАЧЕНЬ

4.1 Описання програмної частини

MATLAB — пакет прикладних програм для числового аналізу, а також мова програмування, що використовується в даному пакеті. Мільйони інженерів і вчених по всьому світу використовують MATLAB для аналізу та проектування систем і продуктів, які перетворюють наш світ.[\[23\]](#)

Матрична мова MATLAB є найприроднішим у світі способом вираження обчислювальної математики. Вбудована графіка спрощує візуалізацію та отримання інформації з даних. Середовище робочого столу пропонує експериментувати, досліджувати та відкривати. Всі ці інструменти та можливості MATLAB ретельно перевірені та розроблені для спільної роботи.

MATLAB дає можливість проводити аналіз на більших наборах даних і масштабувати їх до кластерів і хмар. Код MATLAB можна інтегрувати з іншими мовами, що дає змогу розгорнути алгоритми та програми у веб-, корпоративних та виробничих системах.

Хоча цей продукт спеціалізується на чисельному обчисленні, спеціальні інструментальні засоби працюють з програмним забезпеченням Maple, що робить його повноцінною системою для роботи з алгеброю.

MATLAB має більше, ніж мільйон користувачів на виробництвах і науковців. Ціна базової комерційної версії без інструментів близько 2000 дол. США і лише 100 дол. США для навчальних закладів з мінімальним набором інструментів. [\[24\]](#)

Після запуску MATLAB на екрані з'являється головне вікно системи MATLAB, показане на рис. 4.3. Воно має звичайні засоби правління розмірами, приховування та закриття. У вікні командного режиму показано вікно About MATLAB, яке виводиться однойменною командою у позиції Help меню та дозволяє уточнити версію системи.

Система готова до проведення обчислень у командному режимі. Корисно знати, що на початку запуску автоматично виконується команда `matlabrc`, яка виконує файл завантаження `matlabrc.m` і файл `startup.m`, якщо такий існує. Ці файли текстового формату виконують початкове налаштування терміналу системи та задають ряд її параметрів.

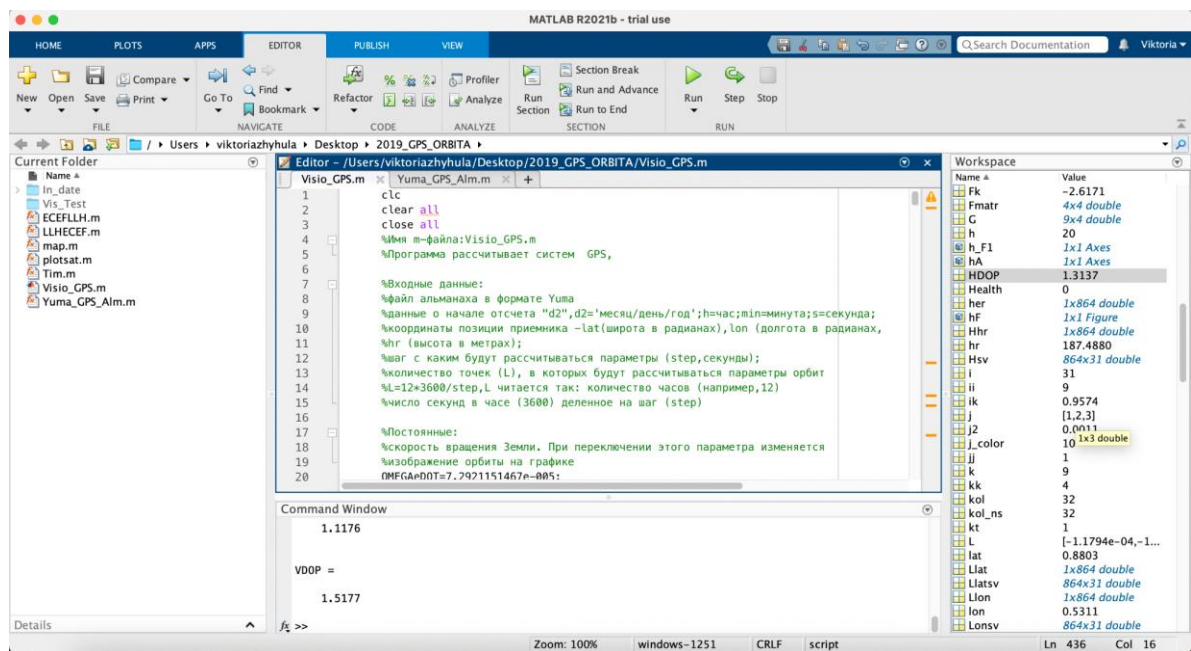


Рис. 4.1. Інтерфейс MATLAB 2021

Графіки в MATLAB будуються в окремих вікнах, що масштабуються і переміщуються. Візьмемо спочатку найпростіший приклад - побудова графіка синусоїди. Слід пам'ятати, що MATLAB буде графіки функцій ряду точок, з'єднуючи їх відрізками прямих, тобто здійснюючи лінійну інтерполяцію функції в інтервалі між суміжними точками. Задамо інтервал зміни аргументу x від 0 до

10 з кроком 0,1. Для побудови графіка досить спочатку задати вектор $x=0:0.1:15$, та був використовувати команду побудови графіків `plot(sin(x))`.

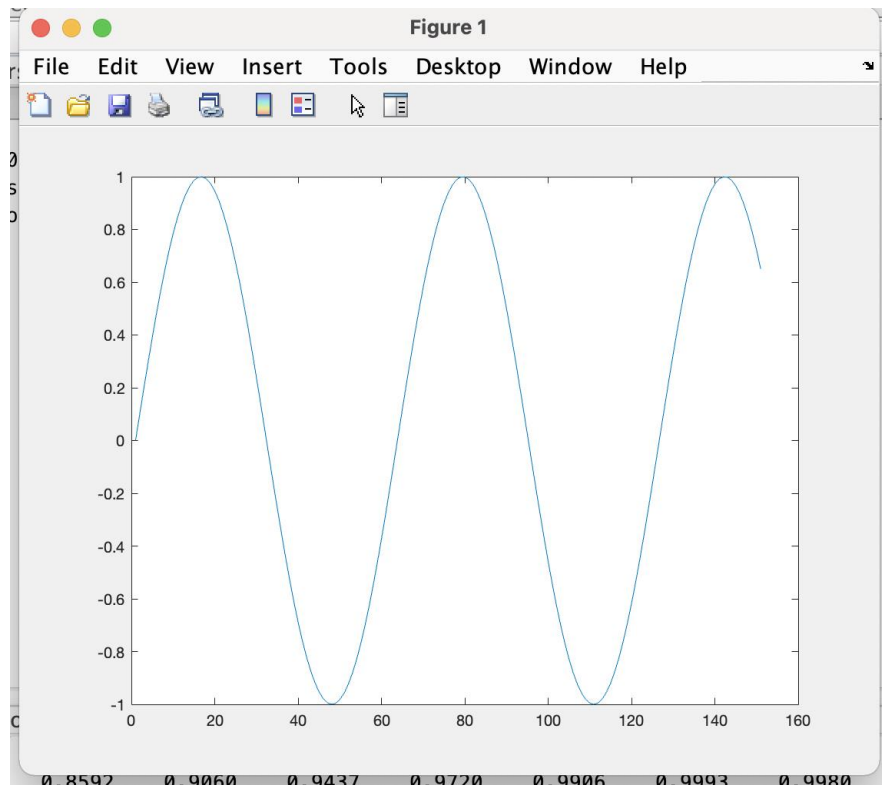


Рис. 4.2. Приклад побудови графічних елементів в MATLAB

4.2 Дослідження впливу інтервалу часу

Для дослідження впливу інтервалу часу, який минув з дати видачі альманаху до моменту його застосування на точність прогнозу параметра GDOP було використано наступну методичку. Для обраної точки розташування користувача і заданої дати за допомогою програми в середовищі MatLab виконувався розрахунок геометричних факторів з використанням поточного альманаху. Після цього виконувався перерахунок тих же самих параметрів з використанням альманахів різного терміну актуальності. Для одержання

базового значення, з яким виконувалось порівняння використано результат, одержаний за допомогою онлайн-сервісу gnssplanningonline.com та з використанням актуального поточного альманаху GPS.

4.2.1 Експеримент

Першим етапом експерименту дослідження впливу інтервалу часу, який минув з дати видачі альманаху до моменту його застосування на точність прогнозу, було завантаження усіх необхідних альманахів у форматі YUMA з сайт navcen.uscg.gov [54]. Всього було використано в експерименті 10 альманахів (рис. 4.5) різної давності видачі. Перший альманах (353) - актуальний на сьогодні.

Name
053.ALM
153.ALM
233.ALM
263.ALM
303.ALM
330.alm
333.ALM
343.ALM
344.ALM
348.ALM
350.ALM
353.ALM

Рис. 4.3. Завантажені альманахи, що використані у дослідженні

Другим етапом експерименту було завантаження альманахів по черзі та отримання результатів за допомогою середовища Matlab, виконувався розрахунок геометричних факторів з використанням необхідного для дослідження альманаху. Результати експериментального використання альманахів різного терміну для оцінки параметру компонентів GDOP і визначення відхилення прогнозу від дійсного значення приведено в табл. 4.1.

Табл. 4.1

Прогнозоване значення параметру, одержане за допомогою альманаху

Пара-метр	Прогнозоване значення параметру, одержане за допомогою альманаху, відповідного терміну									
week	353	350	348	343	333	303	263	233	153	53
PDOP	1,480	1,480	1,480	1,483	1,493	1,813	1,841	1,462	1,584	2,005
HDOP	0,992	0,992	0,997	0,996	1,002	1,151	1,159	0,97	1,003	1,45
VDOP	1,097	1,098	0,098	1,099	1,106	1,400	1,43	1,086	1,226	1,389
GDOP	0,709	0,709	0,709	0,712	0,715	0,975	0,98	0,668	0,073	0,998

Графіки, що були отримані при завантаженні альманаху 353 тижня:

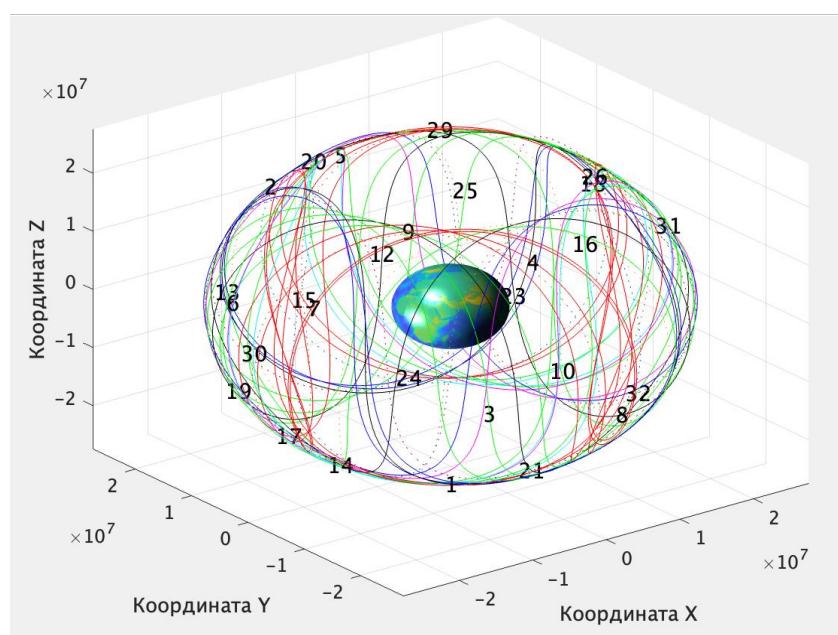


Рис. 4.4. Положення супутників у 3Д моделі

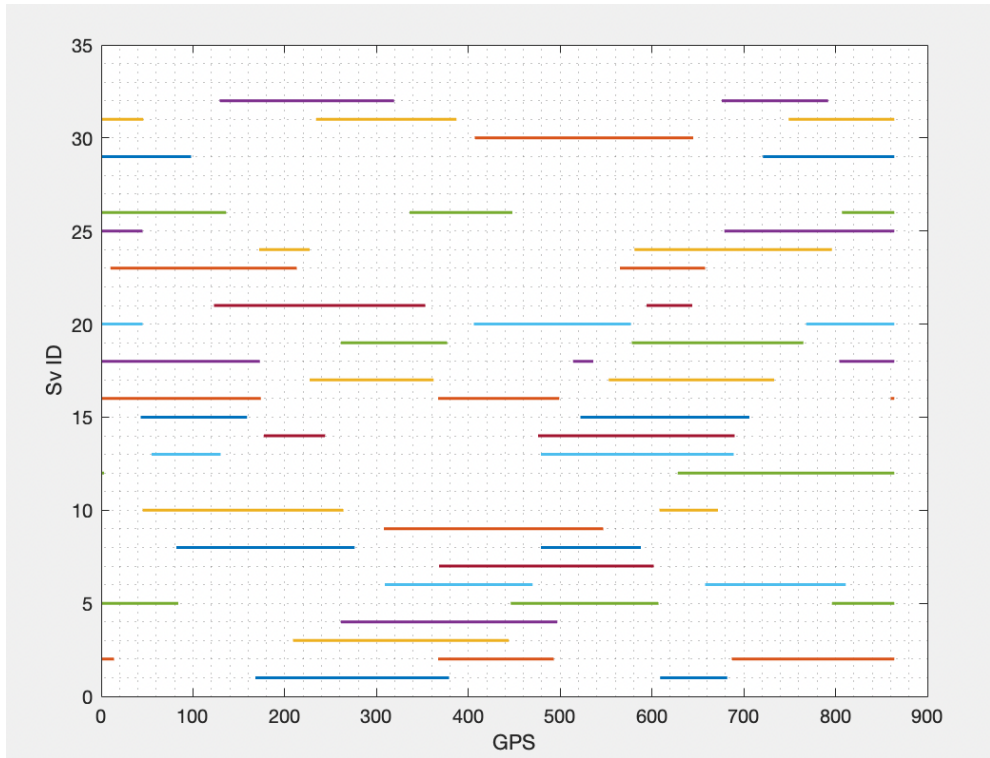


Рис. 4.5. Видимість

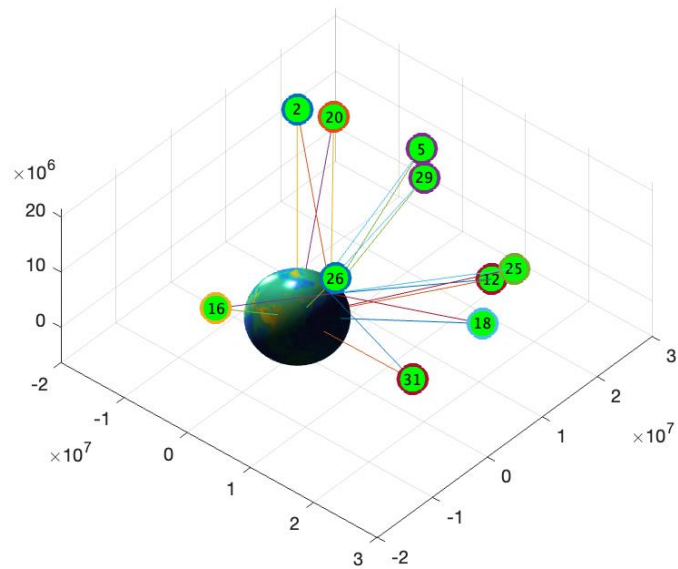


Рис. 4.6. Положення супутників в певний час

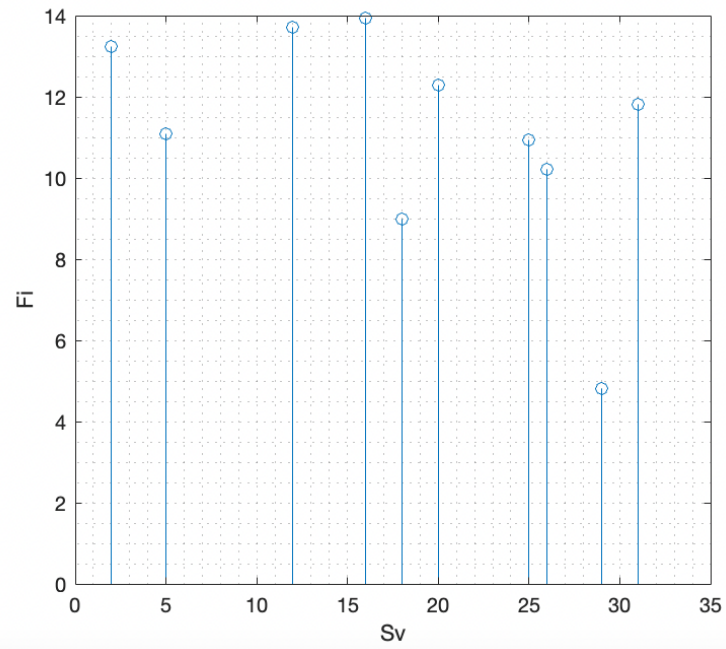


Рис. 4.7. Сигнали

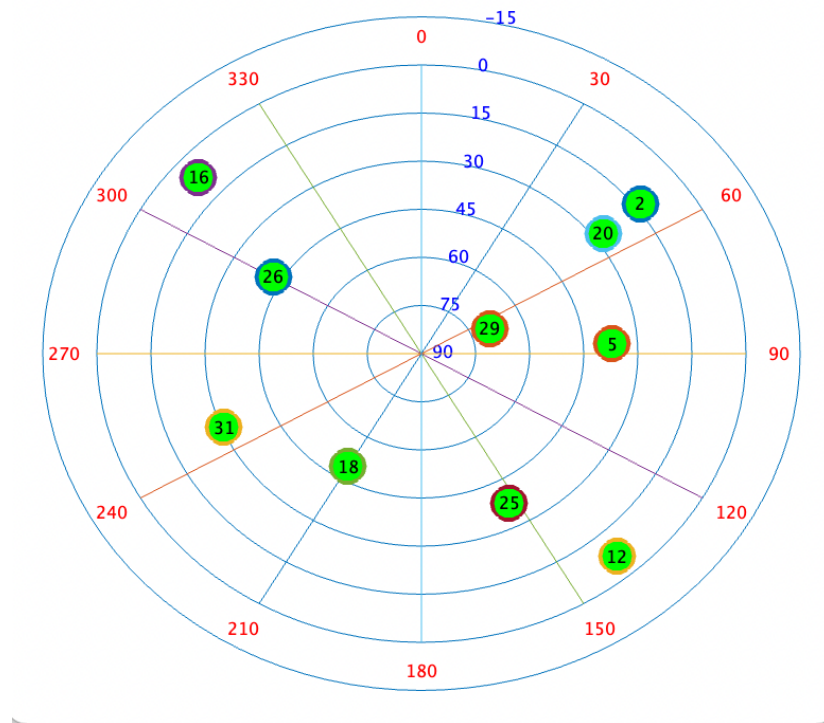


Рис. 4.8. Положення супутників, розраховане в програмі Matlab

Отримані результати (рис.4.11) порівняли з одержаним базовим значенням, з яким виконувалось порівняння використано результат, одержаний за допомогою онлайн-сервісу gnssplanningonline.com та з використанням актуального поточного альманаху GPS (рис. 4.12 та рис 4.13).

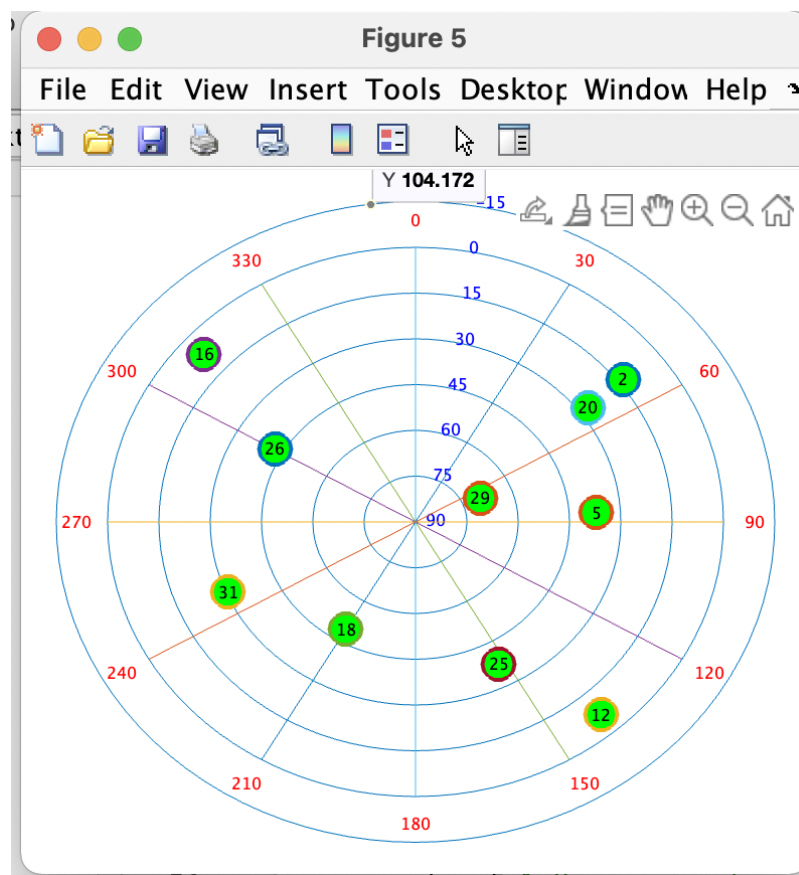


Рис.4.9. Прогноз положень супутників за даними поточного альманаху

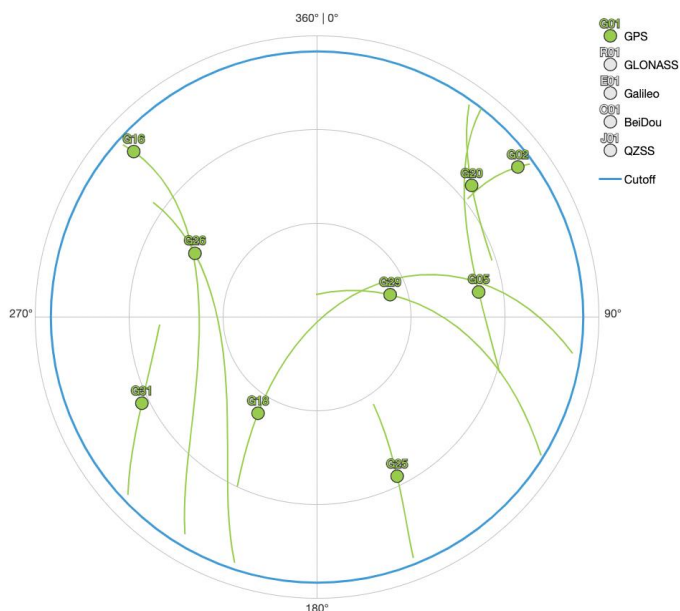


Рис.4.10. Розташування супутників на прийнятий в якості опорного момент час

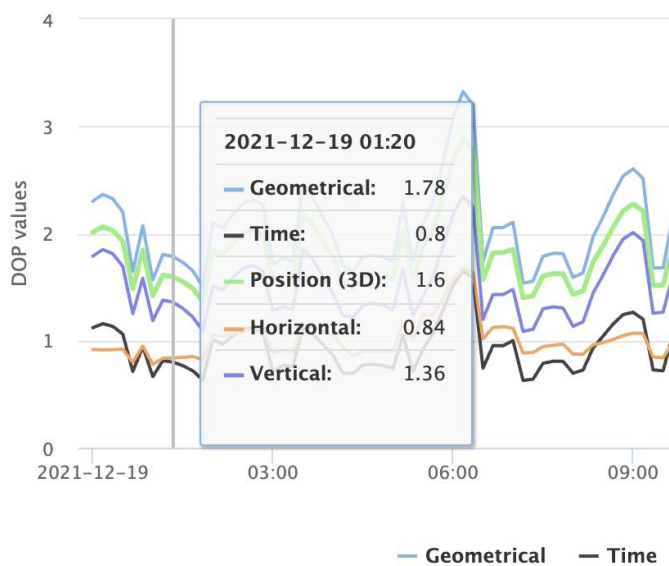


Рис.4.11. Оцінка значення параметрів DOP на обраний момент часу

4.2.2 Відносне відхилення від дійсного значення

Для отримання більш об'єктивних результатів експерименту було розраховане відхилення від дійсного значення у відсотках:

Табл. 4.2

Прогнозоване значення параметру, одержане за допомогою альманаху

Пара-метр	Прогнозоване значення параметру, одержане за допомогою альманаху, відповідного терміну і його відносне відхилення							
week	353	348	333	303	263	233	153	53
PDOP	1,480	1,480	1,493 (0,8%)	1,813 (23%)	1,841 (24%)	1,462 (1,2%)	1,584 (7%)	2,005 (30%)
HDOP	0,992	0,997 (0,5%)	1,002 (1%)	1,151 (16%)	1,159 (17%)	0,97 (2,2%)	1,003 (1%)	1,45 (46%)
VDOP	1,097	0,098 (0,1%)	1,106 (0,8%)	1,400 (27%)	1,43 (30%)	1,086 (1%)	1,226 (12%)	1,389 (27%)
GDOP	0,709	0,709	0,715 (0,8%)	0,975 (37%)	0,98 (38%)	0,668 (6%)	0,731 (3%)	0,998 (41%)

Одержані результати показали, що використання альманаху терміном 3 доби вже призвело до мінімального відхилення в прогнозі. Але при збільшенні інтервалу часу помилка прогнозу у більшості оцінюваних параметрів змінювалась в сторону зростання, збільшуючи відхилення до 25 – 30%, з максимумом у 41% для параметра GDOP з використанням 300-денного альманаху.

Необхідно зазначити, що значення геометричних факторів є чутливими до точних взаємних положень навігаційних супутників і протягом короткого

інтервалу часу можуть зазнавати значних змін, тому проведені дослідження доцільно доповнити аналізом зміни оцінюваних значень на обраному інтервалі часу, а не лише в його окремі моменти.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

В цьому розділі було розглянуто програмне середовище Matlab для визначення положення супутників в певний період часу та на певній ділянці та геометричне погіршення точності. Результати було порівняно з онлайн сервісом, щоб отримати похибку вимірювання при альманахах різної дати виготовлення.

Результати показали, що при використанні більш давніх альманахів при збільшенні інтервалу часу помилка прогнозу у більшості оцінюваних параметрів змінювалась в сторону збільшення, відхилення росте до 25 – 30%, з максимумом у 41% для параметра GDOP з використанням 300-денного альманаху.

ВИСНОВКИ ДО ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ

На основі проведеного нами огляду наукових джерел у першому розділі ми уточнили зміст понять «системи супутникової навігації» також було розглянуто існуючі системи супутникової навігації такі як GPS, ГЛОНАСС, Galileo, Beidou. Описано функціональні сегменти, частотний спектр, зону покриття та супутникові угруповання вище наведених систем. Також було розглянуто послуги які надають ці системи. Була складена порівняльна таблиця цих супутникових систем.

В результаті чого ми дійшли висновку, що використання систем супутникової навігації є невід'ємною складовою нашого дослідження.

У другому розділі було розглянуто навігаційні повідомлення супутників, яких типів вони бувають та для яких цілей використовуються. Серед яких альманах - було розглянуто які формати альманаху існують та яку інформацію містять. Додатково було досліджено ефемериди, їхню ціль використання, режими, тощо.

Також було розглянуто геометричне зниження точності, що це за величина та які компоненти в собі складає

У третьому розділі було описано детальніше термін доступності, а також вимірювання доступності.

У даному розділі було розглянуто також методи прогнозування доступності навігаційних супутників, що були використані у дослідженні. Загалом було виконано дві програми PLANNING та GNSS Planning online.

Завдяки цим програмам ми отримали широкий перелік інформаційних даних, що ми можемо використати для прогнозування положення супутників.

У четвертому розділі ми розглянули програмне середовище Matlab для визначення положення супутників в певний період часу та на певній ділянці та геометричне погіршення точності. Результати було порівняно з онлайн сервісом, щоб отримати похибку вимірювання при альманахах різної дати виготовлення.

В цьому розділі були висвітлені отримані результати, що показані в таблиці 4.2. Згідно отриманих результатів ми можемо зробити висновок, що при використанні більш давніх альманахів при збільшенні інтервалу часу помилка прогнозу у більшості оцінюваних параметрів змінювалась в сторону збільшення, відхилення росте до 25 – 30%, з максимумом у 41% для параметра GDOP з використанням 300-денного альманаху.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Мохіндер С.; Глобальні системи позиціонування, інерційна навігація та інтеграція / Мохіндер С. Груаллоренс Р. Вайлангус П. Ендрюс // Друге видання – 2018. – № 2(54). – ISSN 1997-9568.
2. Konin, V. V.; Kutsenko, O. V.; Lukianenko, E. O.; Pnytska, S. I. "Experimental investigation of multi-GNSS in static mode," Proc. of 2018 IEEE 5th Int. Conf. on Methods and Systems of Navigation and Motion Control, MSNMC, 16-18 Oct. 2018, Kyiv, Ukraine. IEEE, 2018, pp. 179-182. DOI: 10.1109/MSNMC.2018.8576274.
3. Сабатіні Р.; Диференційна система глобального позиціонування (DGPS) для льотних випробувань / Сабатіні Р. Джованні Б. // – 2020. – AC/323(SCI-135)TP/189
4. Канна В.; Основи GPS / Канна В. // Індійський інститут дистанційного зондування, Дехрадун – 2019.
5. Гарді А.; Моделювання та збільшення ефективності GNSS для міської повітряної мобільності / Б. П. Книш, Я. А. Кулик, В. Барабан // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2018. – № 3 (261). – С. 246-252. – ISSN 2307-5732.
6. Каршов, Р. С. Класифікація беспилотных летательных аппаратов [Текст] / Р. С. Каршов // Проблемы науки и образования. – 2016. – № 11(53). – С. 38-40. – ISSN: 2304-2338.
7. Вахтомов, А.В. Навигация. Проблемы и методы посадки беспилотного летательного аппарата (БЛА) [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://dspace.susu.ru/xmlui/bitstream/handle/0001.74/1748/24.pdf?sequence=1>
8. Купервассер, О. Система навигации беспилотных летательных аппаратов с помощью видео / Купервассер О., Рубинштейн А. // IV

конференция "ТРИЗ. Практика применения методических инструментов". – 2012.

9. Семенова, Л. Л. Современные методы навигации беспилотных летательных аппаратов [Текст]// Л. Л. Семенова// Наука и образование сегодня. – 2018. – №27.

10. Doc 9849. Руководство по глобальной навигационной спутниковой системе (GNSS) [Текст] //Международная организация гражданской авиации - Издание второе –Монреаль, 2013. – 100 с.

11. Multi-GNSS (Multi-frequency GNSS) [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: https://www.furuno.com/en/gnss/technical/tec_multi

12. An Introduction to GNSS, Second Edition // NovAtel Inc. – Calgary, Alberta, Canada – 2015. – 100 p.

13. Control Segment [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.gps.gov/systems/gps/control/>

14. Constellation Status [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://www.csno-tarc.cn/en/system/constellation>

15. About EGNOS [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: https://egnos-user-support.essp-sas.eu/new_egnos_ops/egnos-system/about-egnos

16. Matlab documentation 1 [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.mathworks.com/help/matlab/>

17. Оценка дисперсии, среднеквадратичное отклонение [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://cyberpedia.su/9x458d.html>

18. MQ-9A "Reaper" [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.ga-asi.com/remotely-piloted-aircraft/mq-9a#images-7>

19. OEM719 Product Sheet // NovAtel Inc. – Canada – 06/10/2020 – 2 p.

20. Antennas GPS-704-X Product Sheet // NovAtel Inc. – Canada – 2 p.

21. NovAtel Connect v2 User Manual // NovAtel Inc. – Calgary, Alberta, Canada – June 2020 – 86 p.

22. OEM7 Commands and Logs Reference Manual v3 // NovAtel Inc. – Canada – September 2017 – 1030 p.

23. Чаплінський, Д.В. Оцінювання точності позиціонування за інформацією системи ACAS [Текст] / Д.В. Чаплінський, І.В. Остроумов // Проблеми та перспективи розвитку авіації та космонавтики. – Київ.: НАУ, 2013. – С. 12.

ДОДАТОК А

```

clc
clear all
close all

%Имя m-файла:Visio_GPS.m
%Программа рассчитывает систем GPS,
%Входные данные:
%файл альманаха в формате Yuma
%данные о начале отсчета
"d2",d2='месяц/день/год';h=час;min=минута;s=секунда;
%координаты позиции приемника -lat(широта в радианах),lon (долгота в
радианах,
%hr (высота в метрах);
%шаг с каким будут рассчитываться параметры (step,секунды);
%количество точек (L), в которых будут рассчитываться параметры орбит
%L=12*3600/step,L читается так: количество часов (например,12)
%число секунд в часе (3600) деленное на шаг (step)
%Постоянные:
%скорость вращения Земли. При переключении этого параметра изменяется
%изображение орбиты на графике
OMEGAeDOT=7.2921151467e-005;
% OMEGAeDOT= 0;
%радиусы земного эллипсоида
A_WGS84=6378137.0;
B_WGS84=6356752.314;
%константы
mu=3986005000000000;
F_CONST = 4.442807633E-10;
Re = 6378136;% радиус Земли
j_color = 0;
color6(1:11) = ['B' 'R' 'G' 'K' 'B' 'R' 'o' 'o' '+' '+' '+'];
kt=1;%установка времени на титульной надписи графика, определяется
параметрами d2'; h; min; s и j или L;
%Задание цветов для графики
color6(1:14) = ['k' 'b' 'g' 'r' 'c' 'm' 'r' ':' 'g' ':' 'b' ':' 'k'
'h'];
%Входные данные

```

```

Dat = 'In_Date/330.alm';
map(Re); %функция выводит на графики Землю
d2='12/09/2021'; %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
h= 20.0; min=35.0; s=0.0; %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%координаты точки, из которой наблюдаются спутники
lat = 0.88032730015257; %50 градусов 26минут 20.54 секунд
lon = 0.53109641675259; %30 градусов 25 минут 46.4995секунд
hr=187.488; % метр
%Коэффициенты и матрица преобразования
coslon = cos(lon); sinlon = sin(lon);
coslat = cos(lat); sinlat = sin(lat);
Fmatr = [      -sinlon      coslon      0      0;
          -sinlat*coslon -sinlat*sinlon  coslat  0;
          coslat*coslon  coslat*sinlon  sinlat  0;
                   0                   0                   0      1];
mask = 5; % Угол маски (градус)
X_label=['Широта' ':' num2str(lat) ';' 'долгота' ':' num2str(lon) ';'
'высота' ':' num2str(hr)];
step=100; %шаг отсчета времени в секундах (300=5 минутам); шаг можно
изменять
%step=0;
L=(24*3600) / step; % убрать % перед L для вывода таблицы улов видимости
и азимута
%L=1; % установить % перед L для вывода таблицы улов видимости и азимута
kol_ns = 32; % Взять из альманаха последний номер спутника
% Обнуление массивов
nom_ns = zeros(1, kol_ns);
SSv = zeros(L, kol_ns); %*NaN;
S_Sv = zeros(L, kol_ns)*NaN;
Xk = zeros(1,L);
Yk = zeros(1,L);
Zk = zeros(1,L);
PR = zeros(1,L);
PDOP = zeros(1,L);
TT = zeros(1,L);
az = zeros(1,L);
doppler = zeros(1,L);
Llon = zeros(1,L);
Llat = zeros(1,L);
Hhr = zeros(1,L);
A = zeros(1,L);

```

```

D = zeros(1,L);
her = zeros(1,L);
m = zeros(1,L);
sek = zeros(1,L);
t = zeros(1,L);
%Чтение альманаха
[alm,max_kol] = Yuma_GPS_Alm(Dat);
AZ = zeros(L,max_kol);
EL= zeros(L,max_kol);
xt = zeros(L,max_kol);
yt = zeros(L,max_kol);
Lonsv = zeros(L,max_kol);
Llatsv = zeros(L,max_kol);
Hsv = zeros(L,max_kol);
range2 = zeros(1, max_kol);
%nom_ns = zeros(L,max_kol);
nom = 1;
k = 0;
i = 0;
% for i = 1 : max_kol
while ( i < 32)
    i = i+1;
    if ( i > 0)
        Health = alm(i).Health;
        if ( Health == 0)
            k = k + 1;
            nom_ns(k) = i;
        else
            k = k + 1;
            nom_ns(k) = 0;
        end
    end
end % i
kol = k;
fprintf('kol=%i \n', kol);
nom_ns; % - номер навигационного спутника
[Rx,Ry,Rz] = ECEFLH(lon, lat,hr);
%Rx=0;Ry=0;;Rz=0;%центр масс Земли
%Начало отсчета текущего времени
[week,modeweek,d,dweek,weeks]=Tim(d2,h,min,s);
for j = 1:L

```

```

%   for j = 1:L % 0:L
    t( j )=weeks+step*(j); %-step;
    %t1(j) = t(j)/60; %изменение дискретности текущего времени
    d_wn = abs( (week - alm(i).Week)); %проверяется
    for k = 1 : kol
        i = nom_ns(k) ; % input "i"   !!!
        if i > 0
            %d_wn=(modeweek - alm(i).Week);%если в альманахе не учтено 1024 или
2048

            tk = t(j) + d_wn * 604800 - alm(i).TOA;
            %d_wn = abs(modeweek - alm(i).Week);
            dd = 302400.0 + d_wn * 604800;
            if ( alm(i).A05 > 0 ) && ( alm(i).Health == 0 )
                while (abs(tk) > dd)
                    if tk > dd
                        tk = tk - 604800;
                    else
                        if tk < -dd
                            tk = tk + 604800;
                        end
                    end % if
                end % while
                %Справочник по альманаху- цифра в скобках обозначает порядковый номер
                %параметра альманаха в формате YUMA
                %alm(ID).ID(1); alm(ID).Health(2); alm(ID).e(3); alm(ID).TOA(4);
alm(ID).deltai(5);
                %alm(ID).OMEGADOT(6); alm(ID).A05(7); alm(ID).omega0(8);
alm(ID).omega(9);
                %alm(ID).M0(10); alm(ID).Af0(11); alm(ID).Af1(12); alm(ID).Week(13);
                n0=sqrt((mu) / (alm(i).A05^6));
                j2 = 1082.68E-6;
                re = (A_WGS84 + B_WGS84) / 2.;
                sin55 = sin(55.0 * pi / 180.0);
                dn = 1.5 * j2 * re * re / (alm(i).A05^4 ) * (1. - 1.5 * sin55 *
sin55);

                %dn = 0;
                n=n0 * (1 + dn);
                Mk = alm(i).M0 + n*tk;
                e=alm(i).e;
                %решение уравнения Кеплера
                eps = 1.0E-15;

```

```

y = e * sin(Mk);
x1 = Mk;
x = y;
for kk = 0 : 15 % количество итераций
    x2 = x1;
    x1 = x;
    y1 = y;
    y = Mk - (x - e * sin(x));
    if (abs(y - y1) < eps)
        break
    end
    x = (x2 * y - x * y1) / (y - y1);
end % kepler
Ek = x;
deltr = F_CONST * alm(i).e * alm(i).A05 * sin(Ek);
dt1 = alm(i).Af0 + alm(i).Af1 * tk + deltr;
tk = tk - dt1;
%%%%%%%%%%
while (abs(tk) > dd)
    if tk > dd
        tk = tk - 604800;
    else
        if tk < -dd
            tk = tk + 604800;
        end
    end % if
end % while
%%%%%%%%%%
vd = 1. - alm(i).e * cos(Ek);
nuk = atan2(sqrt(1-alm(i).e^2)*sin(Ek) / vd, (cos(Ek)-alm(i).e) / vd);
Ek = acos((alm(i).e+cos(nuk))/(1+alm(i).e*cos(nuk)));
Fk =nuk + alm(i).omega;
uk =Fk;
ik=alm(i).deltai;
rk =(alm(i).A05^2)*(1.0-alm(i).e*cos(Ek));
xkk =rk*cos(uk);
ykk =rk*sin(uk);
OMEGAk =alm(i).omega0+(alm(i).OMEGADOT-OMEGAeDOT)*tk-
OMEGAeDOT*alm(i).TOA;
Xk(j,i) = xkk*cos(OMEGAk)-ykk*cos(ik)*sin(OMEGAk);
Yk(j,i) = xkk*sin(OMEGAk)+ykk*cos(ik)*cos(OMEGAk);

```

```

Zk(j,i) = ykk*sin(ik);
%Dальности до спутников
PR(j,i) = sqrt((Xk(j,i) - Rx)^2 + (Yk(j,i) - Ry)^2 + (Zk(j,i) - Rz)^2);
%Перевод в географическую систему если требуется
%[lons,lats,hrs] = LLHECEF(Xk,Yk,Zk);
%(Llon(j),Llat(j),Hhr(j)) = [lons,lats,hrs];
    %расчет угла видимости спутника
xls = Xk(j,i) - Rx;
    yls = Yk(j,i) - Ry;
    zls = Zk(j,i) - Rz;
    rangel = sqrt(xls*xls+yls*yls+zls*zls);
% if j>1
%     doppler(j-1,i) = (rangel - range2(i)) * 5.2514 / step;
% end
% range2(i) = rangel;
P = sqrt(Rx * Rx + Ry * Ry + Rz * Rz);
tdot = ( Rx*xls+Ry*yls+Rz*zls)/rangel/P;
xll = xls/rangel;
    yll = yls/rangel;
    zll = zls/rangel;
    if tdot >= 1.00
        b = 0.0;
    elseif tdot <= -1.00
        b = pi;
    else
        b = acos( tdot);
    end
    satang = pi/2.0 - b;
    TT =satang;
    TT(j,i) =TT;%угол видимости спутников
    %расчет угла азимута спутников
    xn =-cos(lon)*sin(lat);
    yn =-sin(lon)*sin(lat);
    zn = cos(lat);
    xe =-sin(lon);
    ye = cos(lon);
    xaz = xe*xll + ye*yll;
    yaz = xn*xll + yn*yll + zn*zll;
if (xaz == 0) || (yaz == 0)
    az(j)= 0;
else

```

```

az(j,i) = atan2(xaz,yaz);
end
if az(j,i) < 0
    az(j,i) = az(j,i) + pi*2;
end
    AZ(j,i) =az(j,i) *180/pi;%углы азимута спутников в градусах
    EL(j,i) = TT(j,i) *180/pi;%углы видимости спутников в градусах
    % if EL(j,i) > 5; %20 % 50
% ПЕРЕСЧЕТ ВРЕМЕНИ
% A(j)=mod(t(j),86400);
% her(j)=floor(A(j)/3600);
% m(j)=floor((A(j)-her(j)*3600)/60);
% sek(j)=A(j)-her(j)*3600-m(j)*60;
if EL(j,i) > mask
    elp = (EL(j,i) - 90);
    Ssv(j, k) = nom_ns(k) ;
    S_Sv(j, k) = nom_ns(k) ;
    azp = (AZ(j,i) + 90.0);
    rad = pi / 180;
    x0 = 0; y0 = 0;
    xt(j,i) = (elp * cos(azp * rad));
    yt(j,i) = -(elp * sin(azp * rad));
% fprintf('i=%i j=%i \n' , i, j);
end% if EL(j,i) > mask
    % end
end % ( alm(i).A05 > 0 )
    end% if i > 0
    end %for k = 1 : kol
CC( :, :, j) = [Xk(j,:); Yk(j,:); Zk(j,:)] ;
end % j = time
%%Данные для построения орбит
% kol = 8;
% nom_ns(1:kol) = [1 2 21 24 25 27 30 31];% I - орбита
% kol = 7;
% nom_ns(1:kol) = [3 4 5 7 8 9 19];% II - орбита
% kol = 4;
% nom_ns(1:kol) = [17 21 19 29];% III - орбита
kol = 32;
nom_ns(1:kol) = [1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21
22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32];%орбита
for i=1:kol

```



```

j_color = j_color + 1;
    if (j_color > 11 )
        j_color = 1;
    end
    S = color6(j_color);
    prn = nom_ns(i);
    hold on
h_F1 = gca;
plot3(Xk(:,prn),Yk(:,prn),Zk(:,prn),S, 'LineWidth',0.5);
Aixs = 2.752*10^(7); %Размеры осей на графике
axis([ -Aixs Aixs  -Aixs Aixs  -Aixs Aixs]);
set(get(gcf, 'CurrentAxes'), 'FontSize',12, 'FontName', 'TimesNewRoman');
set(h_F1, 'Position', [0.1 0.1 0.85 0.9]) ;
xlabel('Координата X')
    ylabel('Координата Y'),
    zlabel('Координата Z'),grid on
    str1 = num2str( prn);
    text(Xk(j,prn),
Yk(j,prn),Zk(j,prn),str1, 'FontSize',14, 'FontName', 'TimesNewRoman', 'HorizontalAlig
nment', 'center' );
    end
    SvGPS = 1 : 32;% Номера спутников в альманахе
    SS_v1 = S_Sv(:,SvGPS);
    %%ВИДИМЫЕ СПУТНИКИ
    jj =1;%номер временного отсчета тоже в стр. 526
    SSv1 = SSv(:,SvGPS);
    [VisGPS] = find(SSv1(jj, : ));
    figure
    plot(SS_v1, 'LineWidth', 1.5 ),grid minor
    xlabel('GPS'), ylabel('Sv ID')
    AA = CC(:, :, jj);
    [VSv] = find(SSv(jj, : ));
    N0 = length(VSv);
    NBDC =length(VisGPS) ;
    b = AA(:, :, :);
    VSv1 = nchoosek( VSv, N0);
    nN = size(VSv1,1);
    for n = 1 : 1 %при расчете одной реализации блокировать задать n
    VSv = VisGPS;
    N = length(VSv);%количество спутников
    A =( AA(:, VSv))';

```

```

%%%%%%%% figure 2 %%%%%%%%%%%%%%;
hF = figure('Position',[624 200 392 350],'Color','w');
hA = axes('Position',[0.1 0.1 0.83 0.83], 'LineWidth',
0.5);%,'Color','w');
% hAx = axes('Box', 'off');
map(Re);
% hold on
for ii=1 :N
    hold on
    Sv = VSv(ii);
    plot3(A(ii,1),A(ii, 2),A( ii, 3), 'Marker' , 'o', 'LineWidth' , 2,
'MarkerFaceColor','g', 'MarkerSize',16), grid on;
    plot3([ Rx A(ii,1) ], [Ry A(ii, 2) ], [Rz A(ii,3) ]), grid on;
    plot3([ 0 A(ii,1) ], [0 A(ii, 2) ], [0 A(ii,3) ]), grid on;
    str1 = num2str( Sv, 3);
    text(A(ii,1),A(ii, 2),A( ii,
3),str1,'FontSize',8,'FontName','TimesNewRoman','HorizontalAlignment','center' );
    Prr1 =[ Rx-A(ii,1), Ry- A(ii, 2), Rz- A(ii,3) ];
    Prr2 =[ 0- A(ii,1), 0- A(ii, 2), 0- A(ii,3) ];
    cosFi1 = Prr1(1)*Prr2(1)+Prr1(2)*Prr2(2) +Prr1(3)*Prr2(3);
    cosFi2 = sqrt( Prr1(1)*Prr1(1)+Prr1(2)*Prr1(2) +Prr1(3)*Prr1(3))*...
sqrt( Prr2(1)*Prr2(1)+Prr2(2)*Prr2(2) +Prr2(3)*Prr2(3));
    cosfi = cosFi1/cosFi2;
    Fi(ii) = acos(cosfi)*180/pi;
    view(41, 60)
end
%figure %3
%%%%%%%% figure 3 %%%%%%%%%%%%%%;
hF = figure('Position',[624 100 392 350],'Color','w');
hA = axes('Position',[0.15 0.10 0.8 0.8]);%,'MenuBar',
'none','Color','w');
stem(VSv, Fi),grid minor
% Aixs = 15; %Размеры осей на графике
% axis([ 0 60 0 Aixs]);
xlabel('Sv')
ylabel('Fi')
hold off
%plot([Xa Xb], [Ya Yb])
X=0;Y=0;Z=0; T1 =0.0;
%X=3504471.02300000;Y=2061336.87600000;Z=4898010.97500000;T1=0.0;
%ТОЧНОСТИ

```

```

eps1 = 0.1;
dX=eps1*10;
dY=eps1*10;dZ=eps1*10;%dT1=eps1*10;
apred=[X Y Z ];%T1];
da=[eps1*10 eps1*10 eps1*10 ];%eps1*10];%abs(apred)
while da > eps1%[eps1 eps1 eps1]% eps1]
%a=[X Y Z T1];
a=[X Y Z ];
  %R=[a;a;a;a;a;a;a;a;a;a];
R = repmat(a, N, 1);
  % R;
%R = repmat(a, size(VSv1,1), 1);
%Rx=3504451.023+20;Ry=2061316.876+20;Rz=4897990.975+20;
% Rx=3504471.02300000;Ry=2061336.87600000;Rz=4898010.97500000;
%Измеренные псевдодальности
W=0;%коэффициент при искусственно введенной ошибке в псевдодальности
j = 1:3; i =1 : N;
  P(i)=sqrt((A(i,1)-Rx).^2+(A(i,2)-Ry).^2....
  +(A(i,3)-Rz).^2)+W*299792.458;%+18.162;%
  % %Расчетные псевдодальности
PR(i)=sqrt((A(i,1)-R(1,1)).^2+(A(i,2)-R(1,2)).^2....
  +(A(i,3)-R(1,3)).^2);
  for i=1 : N
    D(i, 1:3)=(A(i, 1:3) - R(i,1:3))/PR(i);
  end
  % PR';
D;
nn = 1: N ;
DD = D;
%Расчет приращений
L(nn)=PR(nn)-P(nn);
W1=eye(N);
%G=DD(VSv,1:4);
G=DD(nn,1:3);
G(nn,4) = 1;
DL=L(nn);
Dr = inv(G'*W1*G)*G'*W1*DL';
%Конечный результат
%a1=a+(Dr(1:4))';
a1=a+(Dr(1:3))';
X=a1(1);Y=a1(2);Z=a1(3);%Dr(4)=a1(4);

```

```

dX=abs(a1(1)-apred(1));
dY=abs(a1(2)-apred(2));
dZ=abs(a1(3)-apred(3));
%dT1=abs(a1(4)-apred(4));
%da=[dX dY dZ dT1];
da=[dX dY dZ];
apred=a1;
%Dr(4);
  %RM=(inv(G'*G));
  RM = (inv((G*Fmatr)'*(G*Fmatr))) ;
  % %DOP=sqrt(RM(1,1)+RM(2,2)+RM(3,3)+RM(4,4))
  PDOP(n)=sqrt(RM(1,1)+RM(2,2)+RM(3,3));
  % HDOP=sqrt(RM(1,1)+RM(2,2));
  % %%%%%%%%%%%RAIM%%%%%%%%%%
  % promA = RM*G';
  % promB = G*promA;
  % for k = 1 : N
  %   %gdopN(k) = sqrt((promA(1,k)^2 + promA(2,k)^2 + promA(3,k)^2 +
promA(4,k)^2)/(1 - promB(k,k)));
  %   pdopN(k) = sqrt((promA(1,k)^2 + promA(2,k)^2 + promA(3,k)^2)/(1 -
promB(k,k)));
  %   hdopN(k) = sqrt((promA(1,k)^2 + promA(2,k)^2)/(1 - promB(k,k)));
  %   vgdopN(k) = sqrt((promA(3,k)^2)/(1 - promB(k,k)));
  %   %   tdopN(k) = sqrt((promA(4,k)^2)/(1 - promB(k,k)));
  % end
  %%%%%%%%%%%
  %TDOP=sqrt(RM(4,4))
  %VDOP=sqrt(RM(3,3))
  %COOR=a1';
end
COOR=a1';
% PDOP;
end
% Krit = [VSv' pdopN'];
% %QutPDOP = [ (1: nN)' PDOP']
QutPDOP = PDOP';
%%%%%%%% figure 5 %%%%%%%%%%;
plotsat(90, 0)
hold on
% jj = 407; % то же в стр. 317
for k=1:N

```

```

i = VSv(k);
plot(xt(jj, i),yt(jj, i), 'Marker' , 'o', 'LineWidth' , 2,
'MarkerFaceColor', 'g', 'MarkerSize', 16), grid minor
str1 = num2str( i, 3);
xlabel('GALILEO')
text(xt(jj, i), yt(jj,
i),str1,'FontSize',8,'FontName','TimesNewRoman','HorizontalAlignment','center' );
axis( [-100 100 -100 100]);
axis( [-90 90 -90 90]);
xlabel('GALILEO')
legend('BDS')
end
hold off
% end
%clear
%%%%%%%%%%%%%%
% GDOP
% Qut
COOR
% Угол между двумя подпространствами вычисляет функция subspace:
% •theta = subspace(A,B) - возвращает угол между двумя
подпространствами,
% натянутыми на столбцы матриц A и B. Если A и B - векторы-столбцы
% единичной длины, то угол вычисляется по формуле  $\arccos(A'*B)$ .
% Если некоторый физический эксперимент описывается массивом A,
% а вторая реализация этого эксперимента - массивом B, то subspace(A,B)
% измеряет количество новой информации, полученной из второго
эксперимента
% и не связанной со случайными ошибками и флуктуациями.

```

ДОДАТОК Б

УДК 629.783(043.2)

Погурельський О.С., к.т.н., доцент

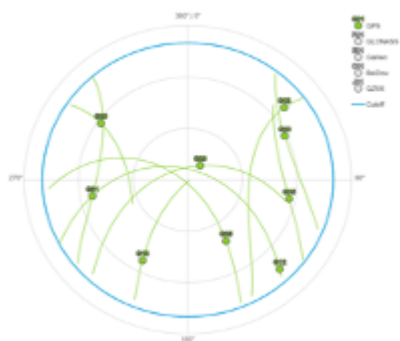
Жигула В.В., студентка

Національний авіаційний університет, м. Київ

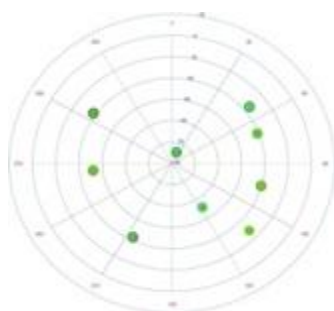
ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ІНТЕРВАЛУ ОНОВЛЕННЯ ДАНИХ АЛЬМАНАХУ GNSS НА ТОЧНІСТЬ ПРОГНОЗУ ПАРАМЕТРА GDOP

Альманах супутникових систем представляє собою не оперативну інформацію у складі навігаційних повідомлень GNSS. Вона використовується приймальним обладнанням для початкового розрахунку положень супутників з метою більш швидкого захоплення їх сигналів і мінімізації інтервалу часу до одержання першого значення координат (TTFF – Time To First Fix). Після сеансу роботи альманах зберігається в пам'яті приймача для можливості наступного так званого «теплого старту» (warm start). Протилежним йому є «холодний старт» (cold start), коли альманах на момент ініціалізації невідомий, або відбулась значна зміна положення приймача після останнього робочого сеансу. Різниця в значенні TTFF для «теплого» і для «холодного» стартів може сягати 12-15 хвилин.

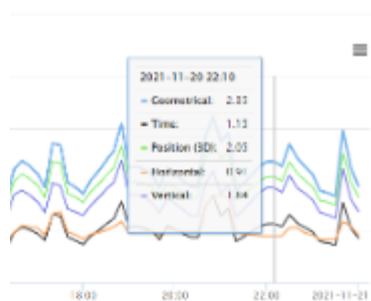
Також дані альманаху використовуються для прогнозування геометричних факторів погіршення точності (GDOP – Geometrical Dilution of Precision), які впливають на якість навігаційних визначень. Попередньо створений прогноз GDOP дозволяє обрати найбільш сприятливий інтервал часу для проведення високоточних вимірювань, або принаймні уникнути пікових значень, коли несприятлива геометрія розташування навігаційних супутників над користувачем призведе до збільшення рівня помилок у визначенні його координат.



а)



б)



в)

Рисунок 2. Розташування супутників на прийнятий в якості опорного момент часу (а), прогноз положень супутників за даними поточного альманаху (б), оцінка значення параметрів DOP на обраний момент часу (в).

Результати експериментального використання альманахів різного терміну для оцінки параметру GDOP і визначення відхилення прогнозу від дійсного значення приведено в табл. 1.

метр	Пара	Прогнозоване значення параметру, одержане за допомогою альманаху відповідного терміну і його відносне відхилення від дійсного значення				
		актуальний	3 days	10 days	30 days	100 days
P	GDO	2.348	1.943	1.943	1.399	1.986
	7		5 (17%)	9 (17%)	7 (40%)	0 (15%)
P	PDO	2.050	1.721	1.721	1.274	1.758
	7		5 (16%)	9 (16%)	7 (37%)	0 (14%)
P	HDO	1.311	1.248	1.248	0.953	1.259
	8		4 (5%)	5 (5%)	9 (27%)	5 (5%)
P	VDO	1.576	1.185	1.185	0.845	1.226
	3		3 (25%)	8 (25%)	5 (46%)	5 (22%)

Одержані результати показали, що використання альманаху терміном 3 доби вже призвело до відхилення в прогнозі на 15%. При збільшенні інтервалу часу помилка прогнозу у більшості оцінюваних параметрів змінювалась в сторону зростання, збільшуючи відхилення до 25 – 30%, з максимумом у 40% для параметра GDOP з використанням 30-денного альманаху.

Необхідно зазначити, що значення геометричних факторів є чутливими до точних взаємних положень навігаційних супутників і протягом короткого інтервалу часу можуть зазнавати значних змін, тому проведене дослідження доцільно доповнити аналізом зміни оцінюваних значень на обраному інтервалі часу, а не лише в його окремі моменти.